

Títol:

Comportamiento de estructuras de acero inoxidable
ferrítico sometidas a *web crippling* y formulación de
nuevas propuestas para el cálculo de la resistencia
última

Realitzat per:

Víctor Enrech Martín

Dirigit per:

Esther Real Saladrigas

Data

Octubre de 2019

Departament

Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Resumen (highlights)

Los elementos de acero conformados en frío son muy utilizados en el mundo de la construcción debido a sus buenas prestaciones y un gran ratio resistencia/peso en comparación a otros materiales. Ese buen ratio resistencia/peso con los valores elevados de altura/espesor y anchura/espesor provoca que lamentablemente sean más susceptibles a problemas de abolladura o web crippling.

Concretamente, aquellos elementos de acero conformados en frío en los que se usa acero inoxidable los hace una alternativa muy interesante frente a ambientes exponencialmente corrosivos para la seguridad de los mismos. Además, los elementos de acero inoxidable ferrítico tiene un precio medianamente estable gracias a su bajo contenido en níquel por lo cual son una alternativa muy llamativa a largo plazo frente a los que estén conformados con hacer inoxidable austenítico.

Sin embargo, si se rige por las formulaciones estipuladas por las normativas convencionales se puede comprobar que las especificaciones para acero al carbono coinciden con las de acero inoxidable y tampoco hay ninguna en concreto para el acero inoxidable ferrítico.

Esta problemática ha motivado a la realización de distintos proyectos estos últimos años para la elaboración de nuevas guías de diseño adaptadas para cualquier elemento de acero inoxidable. En este trabajo se buscará de la misma manera analizar toda la información disponible sobre el acero inoxidable, el web crippling, las distintas normativas y nuevos proyectos para poder proponer nuevas formulaciones que se puedan complementar a estas nuevas guías de diseño.

Cold formed steel elements are widely used in the world of construction due to their good performance and a high strength / weight ratio compared to other materials. That good strength / weight ratio with high height / thickness and width / thickness values makes them unfortunately more susceptible to problems with dents or web crippling.

Specifically, those cold-formed steel elements in which stainless steel is used make them a very interesting alternative to exponentially corrosive environments for their safety. In addition, the elements of ferritic stainless steel have a fairly stable price thanks to their low nickel content so they are a very striking long-term alternative to those that are formed with making austenitic stainless.

However, if it is governed by the formulations stipulated by conventional regulations, it can be verified that the specifications for carbon steel coincide with those of stainless steel and there is none specifically for ferritic stainless steel.

This problem has motivated the realization of different projects in recent years for the development of new design guides adapted for any stainless steel element. This work will seek in the same way to analyze all the information available on stainless steel, the web crippling, the different regulations and new projects to be able to propose new formulations that can complement these new design guides.

Tabla de contenido

Contenido

Resumen (highlights)	2
1. Introducción.....	6
1.1 Contexto actual.....	6
1.2 Objetivos del proyecto	7
2. Estado del arte	8
2.1 Acero inoxidable	8
2.2 Historia	9
2.3 Clasificación	11
2.4 Denominación.....	12
2.5 Propiedades, forma de los productos y acabado superficial	13
2.6 Aceros inoxidables ferríticos	15
3. Web crippling.....	17
3.1 Introducción	17
3.2 Ensayos realizados para determinar la resistencia última a web crippling web estructuras de acero inoxidable:	19
3.3 Normativa existente	20
3.3.1 Eurocódigo 3	21
3.3.2 NAS.....	28
3.3.3 ASCE	30
3.4 Propuestas y estudios realizados	33
3.4.1 Li and Young (2019).....	33
3.4.2 Bock (2014).....	34
4. Estudio experimental y comparativo.....	37
4.1 Propuesta Eurocódigo 3	38
4.2 Propuesta NAS	39
4.3 Propuesta ASCE.....	40
4.4 Propuesta Li and Young (2018)	42
4.5 Propuestas Bock:.....	43
4.5.1 Propuesta basada en el Eurocódigo	43
4.5.2. Propuesta basada en Direct Strength Method	45
5. Recomendación inicial	46

6. Propuestas alternativas y estudio de la metodología “Direct Strength Method”	47
6.1 Propuestas basadas en el “Direct Strength Method”	47
7. Nueva propuesta	55
7.1 Nueva propuesta basada en Direct Strength Method	55
7.2. Nueva propuesta basada en la modificación de la ASCE	58
8. Recomendaciones finales	62
8. Conclusiones	63
9. Anejos de resultados	65
9.1 Resultados experimentales de Li and Young (2018)	65
9.1.1 External One Flange	65
9.1.2 Internal One Flange	67
9.1.3 External Two Flanges	69
9.1.4. Internal Two Flanges	71
9.2 Resultados experimentales por las distintas propuestas	73
9.2.1 External One Flange	73
9.2.2 Internal One Flange	74
9.2.3 External Two Flanges	77
9.2.4 Internal Two Flanges	79
9.3 Comparativa de los distintos ratios promedios obtenidos	82
9.3.1. External One Flange	82
9.3.2. Internal One Flange	82
9.3.3. External Two Flanges	83
9.3.4. Internal Two Flanges	83
9.4. Resultados finales	84
9.4.1 External One Flange	84
9.4.2 Internal One Flange	84
9.4.3. External Two Flanges	84
9.4.4. Internal Two Flanges	85
10. Referencias	86

1. Introducción

1.1 Contexto actual

El acero inoxidable es un material relativamente reciente que tiene un gran abanico de distintas aplicaciones muy útiles e interesantes que se adaptan mejor a los otros materiales disponibles para dicha aplicación. Precisamente en el ámbito de la construcción que es el que nos corresponde, el acero inoxidable posee unas muy buenas propiedades mecánicas con una gran resistencia a la corrosión a diferencia del acero al carbono (convencional).

Sin embargo, no es tan utilizado como debería serlo debido a las incertidumbres físicas y mecánicas que no están tan bien estudiadas como el acero al carbono. Por ello, es de vital importancia seguir investigando y estudiando su comportamiento a cualquier posible adversidad. Ya que actualmente se utiliza la normativa existente dedicada al acero al carbono y hace falta proponer nuevas fórmulas para conocer su comportamiento debidamente.

Una de esas incertidumbres que no están bien definidas en la normativa (tanto en el Eurocódigo, la NAS, la ASCE, ...) es la resistencia de los elementos conformados en frío a la deformación. Por ejemplo, en la normativa del Eurocódigo existe un apartado dedicado al acero inoxidable (Parte 1-4) pero cuando entra en detalles a la determinación de esta resistencia nos remite a la parte 1-3 (referente al acero al carbono).

Los elementos conformados en frío acostumbran a ser esbeltos y poseer un gran ratio resistencia/peso. Debido a ello son altamente susceptibles a problemas de abolladuras bajo la aplicación de cargas localizadas. Para determinar dicha susceptibilidad es necesario comprobar la resistencia de muestras de acero al carbono y obtener unas nuevas expresiones mediante un ajuste estadístico en base a los datos experimentales. Este tipo de problemas pueden mermar gravemente la resistencia última de estas probetas por lo que es necesario chequear si las formulas existentes en la normativa, a pesar de estar definidas en base a probetas de acero al carbono, dan resultados igualmente válidos para asegurar la estabilidad de las mismas.

Durante los últimos años se han realizado extensas campañas experimentales y estudios numéricos relativos a este fenómeno en secciones de acero inoxidable.

1.2 Objetivos del proyecto

Teniendo en cuenta todo esto, este trabajo tiene varios objetivos en mente:

1. Realizar un detallado trabajo de búsqueda de información sobre el acero inoxidable y el fenómeno de abolladura del alma bajo cargas transversales locales, conocido como “web crippling”.
2. Conocer las normativas existentes para estructuras de acero (al carbono).
3. Estudiar las nuevas propuestas realizadas para estructuras de acero inoxidable.
4. Analizar una serie de datos experimentales de probetas de acero inoxidable ferrítico sometidos al fenómeno de web crippling en sus distintos escenarios posibles.
5. Comprobar y analizar la eficacia de todas las propuestas existentes para determinar la resistencia bajo cargas transversales locales (EC3, NAS, ASCE, propuestas de Young, propuesta de Bock).
6. Compararlas entre sí y realizar una serie de recomendaciones a la hora de poder utilizarlas o no para todos los casos posibles de web crippling.
7. Realizar nuevas propuestas en base a las propuestas existentes recalibrando las fórmulas que utilizan para mejorar su eficacia a la hora de determinar el colapso de la probeta.

2. Estado del arte

2.1 Acero inoxidable

El acero inoxidable [1] corresponde a una familia de aceros con buenas prestaciones mecánicas y resistentes que proporciona una gran posibilidad de aplicaciones más allá del campo constructivo. Además, es un tipo de aceros que contiene determinadas aleaciones que les otorgan propiedades distintas y mejoradas a las del acero al carbono entre las que destaca su buena resistencia a la corrosión. Esto lo convierte en un material muy útil sobretodo en escenarios donde exista un peligro evidente a ambientes altamente corrosivos.

Todas estas aleaciones contienen un porcentaje de cromo mayor o igual al 10,5% en la superficie. Este elemento es el encargado de formar una capa pasiva de óxido para proteger el acero frente a elementos corrosivos como el oxígeno. La eficacia de esta capa protectora está directamente relacionada con el contenido de cromo que contenga la aleación, el entorno en el que se encuentre o si añadimos o no adiciones a nuestra aleación (generalmente molibdeno y nitrógeno). Los porcentajes de cromo, carbono y las distintas aleaciones están especificadas en la normativa UNE EN 10088 [1]. Estas propiedades dotan al acero inoxidable de aplicaciones en distintos campos: alimentación, medicina, automoción, construcción, ...

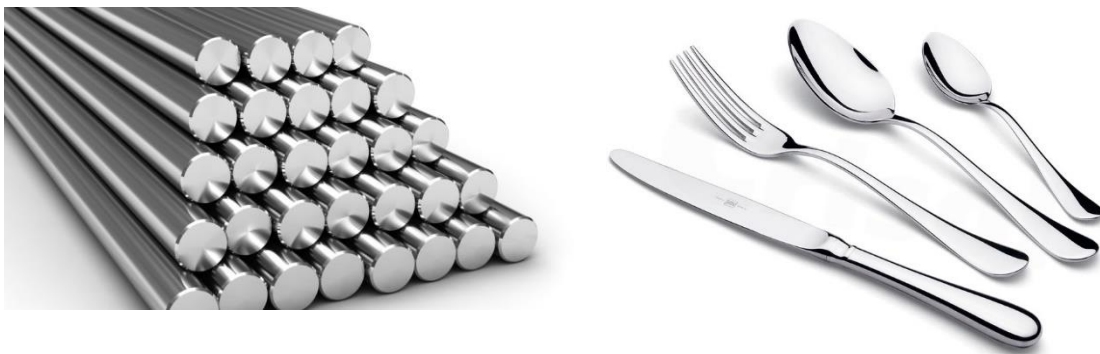


Figura 2.1 Distintas aplicaciones del acero inoxidable

En nuestro campo, la construcción, tiene un rol fundamental en todos aquellos ambientes altamente corrosivos donde si queremos usar acero al carbono tenemos que reducir la cantidad de acero para alargar la resistencia y la vida útil de la estructura a costa de una mayor inversión a largo plazo por el mantenimiento de la misma. Usar acero inoxidable posiblemente sería una mayor inversión a corto plazo debido a la complejidad que atañe el mismo, pero los costos de mantenimiento y reparaciones se verían reducidos considerablemente como se muestra en la figura 2.2.

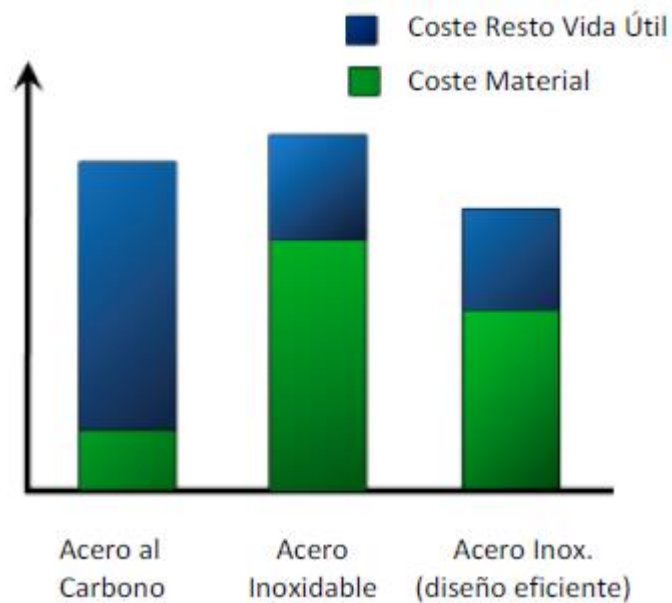


Figura 2.2. Gráficas del ciclo de vida de estructuras de acero

2.2 Historia

Es complicado definir con certeza cuando comenzó a acuñarse la familia del 'acero inoxidable' ya que es una idea que surgió en 1820 por los ingleses Stoddard y Farraday pero no se presentó una patente hasta 1872 por Woods y Clark.

Pero no fue hasta 1904 gracias a las investigaciones del científico inglés Leon Guillet [2] que no obtuvimos los primeros aceros inoxidables bajos en carbono actualmente conocidos como 410, 420, 422, 446 y 440C.

Otros nombres destacados fueron el de Harry Brearley y la empresa Krupp Iron [2]. A Harry Brearley se le encomendó desarrollar cañones de pistola que fueran resistentes a la corrosión y lo consiguió en 1913. Además, a posteriori patentó nuevos aceros inoxidables resistentes a distintos ataques químicos como el vinagre y el jugo de limón por lo que empezó a fabricar aceros para la cuchillería. Krupp Iron por otra parte patentó un casco de una embarcación con una aleación cromo-níquel.

Desde entonces han ido surgiendo nuevas patentes de acero inoxidable con distintas aplicaciones: cubertería y utensilios de cocina, procesamiento de gas y

petróleo, producción y almacenamiento de alimentos, aplicaciones médicas (material quirúrgico, implantes, equipos médicos, ...), sistemas de escape de vehículos, construcción, edificación, ...

En 1930 ya tuvimos la primera gran construcción del edificio Chrysler de 318 metros de altura en la que su cúpula de acero fue revestida con acero inoxidable y la cual ha tenido que ser limpiada solamente dos veces desde su construcción (1961 y 1995).

Independientemente de las buenas prestaciones mecánicas y resistentes a la corrosión, también ha sido utilizado como un material “de lujo” que otorga un gran valor estético en la propia construcción civil.

En la figura 1 podemos observar a Harry Brearley, uno de los padres del acero inoxidable como conocemos hoy día.

En la figura 2 tenemos un edificio construido recientemente en 2005 gracias al acero inoxidable. Este edificio es el centro Richard B. Fisher y está ubicado en Annandale-on-Hudson, Nueva York



Figura 1.3 Harry Brearley

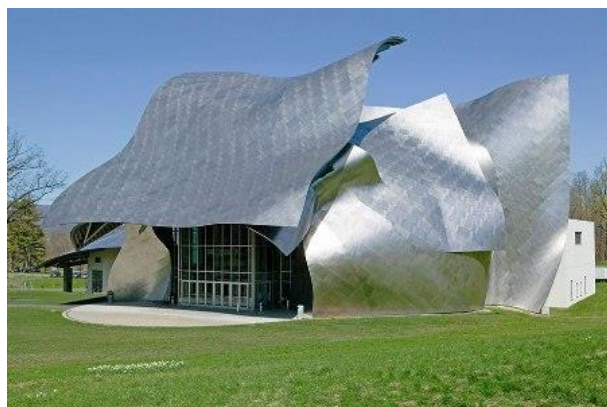


Figura 2.4 Centro Richard B. Fisher

2.3 Clasificación

Las distintas posibilidades de aleaciones de cromo con sus respectivas aleaciones provocan que existan centenares de calidades de acero inoxidable. Sin embargo, todas ellas se pueden dividir en 5 grupos principales:

1. Aceros inoxidables austeníticos: Contienen entre un 0,015-0,01% de carbono, un 17-18% de cromo y un 8-11% de níquel. Esta aleación les proporciona una gran resistencia a la corrosión, una elevada ductilidad, sencilla conformabilidad y soldabilidad. Representan el 70% de la producción mundial de acero inoxidable y son los más utilizados en el campo de la edificación y la construcción.

2. Aceros inoxidables ferríticos: Contienen entre un 0,02-0,06% de carbono y un 10,5-18% de cromo. Pueden llegar a tener prestaciones similares a los aceros austeníticos en cuanto a la resistencia a la corrosión, pero el resto de ellas están más limitadas. Es por eso que su precio suele ser reducido y tiene otras aplicaciones principalmente enfocadas a condiciones atmosféricas suaves, interiores o elementos estructurales.

3. Aceros inoxidables dúplex (austenítico-ferrítico): Contienen un 0,02% de carbono, un 20-26% de cromo, un 1-8% de níquel, un 0,05%-5% de molibdeno y un 0,05%-0,3% de nitrógeno. Tienen prestaciones muy similares a los dos grupos anteriores y un precio más estable debido al bajo contenido en níquel. Son el doble de resistentes que los austeníticos por lo que pueden construirse secciones más pequeñas y ligeras (lo cual lo convierte en un material interesante en la construcción de puentes).

4. Aceros inoxidables martensíticos: La principal diferencia de esta familia con el resto es el gran contenido de carbono (0,1%, 5-10 veces mayor que el resto). Son aceros con muy buena resistencia mecánica, al desgaste o la abrasión, pero con una resistencia a la corrosión limitada. Por lo cual sus aplicaciones principales están ligadas a la cubertería, elementos quirúrgicos, cuchillos industriales, turbinas, ...

5. Aceros inoxidables endurecidos por precipitación: Es una familia de aceros con una resistencia muy buena debido a que es fácilmente mejorable con tratamientos térmicos, pero una no tan buena resistencia a la corrosión. Suelen utilizarse para la industria aeroespacial.



Figura 2.5 Aplicaciones de distintos grados de acero inoxidable (turbina a la izquierda y puente a la derecha)

2.4 Denominación

Esta denominación es diferente en función de si escogemos la normativa europea (norma EN 10088 [3]) o la americana SEI/AISI. En cualquier caso, las prestaciones de cada denominación son similares entre distintas normativas así que en la siguiente tabla (tabla 2.1) vienen especificados los diferentes grados en función de la categoría correspondiente según la normativa europea:

Tabla 2.1. Nomenclatura de los aceros inoxidables

	Grado	Producto ¹⁾	Espesor máximo (mm)	Minima resistencia ²⁾ correspondiente al 0.2% (N/mm ²)	Resistencia última a tracción (N/mm ²)	Alargamiento de rotura (%)
Aceros inoxidables austeníticos básicos de cromo y níquel	1.4301	C	8	230	540 – 750	45 ⁽³⁾
		H	13,5	210	520 – 720	45 ⁽³⁾
		P	75	210	520 – 720	45
	1.4307	C	8	220	520 – 700	45
		H	13,5	200	520 – 700	45
		P	75	200	500 – 700	45
Aceros inoxidables austeníticos de molibdeno, cromo y níquel	1.4401	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
	1.4404	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
Aceros inoxidables austeníticos estabilizados	1.4541	C	8	220	520 – 720	40
		H	13,5	200	520 – 720	40
		P	75	200	500 – 700	40
	1.4571	C	8	240	540 – 690	40
		H	13,5	220	540 – 690	40
		P	75	220	520 – 670	40
Aceros inoxidables austeníticos bajos carbono, altos en nitrógeno	1.4318	C	8	350	650 – 850	35
		H	13,5	330	650 – 850	35
		P	75	330	630 – 830	45
	1.4362	C	8	450	650 – 850	20
		H	13,5	400	650 – 850	20
		P	75	400	630 – 800	25
Aceros inoxidables dúplex	1.4462	C	8	500	700 – 950	20
		H	13,5	460	700 – 950	25
		P	75	460	640 – 840	25

Notas:

- 1) C=fleje laminado en frío, H=fleje laminado en caliente, P=chapa laminada en caliente
- 2) Propiedades transversales
- 3) Para material más estirado, los valores mínimos son un 5% más bajos

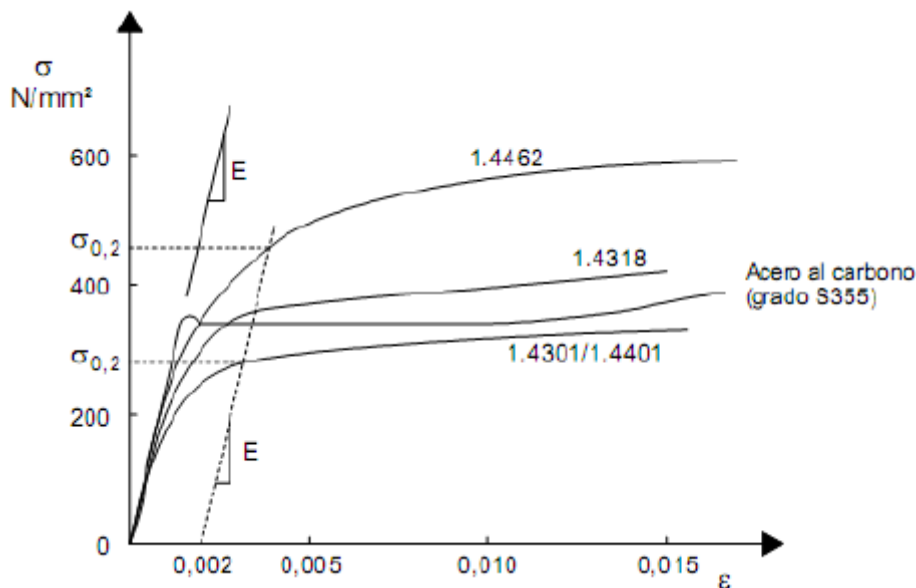
2.5 Propiedades, forma de los productos y acabado superficial

Una de las propiedades a tener en cuenta a la hora de estudiar la viabilidad de un material en el ámbito constructivo es su curva tensión-deformación con la que podemos sacar distintos parámetros entre los que destaca el modulo elástico.

El problema reside en que el acero al carbono este módulo elástico está claramente definido ya que la curva tensión-deformación tiene dos fases muy diferenciadas: comportamiento lineal + comportamiento 'más o menos constante'. Sin embargo, los aceros inoxidables difieren en esta zona constante

ya que es ligeramente creciente. La velocidad de dicho crecimiento viene determinada por el tipo de acero inoxidable.

Debido a eso se utiliza de forma convencional la tensión para un valor determinada de deformación remanente correspondiente al 0,2%. Este comportamiento es relativamente práctico de demostrar realizando test de laboratorio y midiéndolo analíticamente como se puede mostrar en la siguiente gráfica (gráfica 2.1)



Gráfica 2.1. Comportamiento elástico de distintos grados de acero

Sin embargo, en la práctica no solamente importa el límite elástico, sino otros factores como el trabajado de la pieza. En los aceros inoxidables se puede realizar un trabajado en frío que mejora sus propiedades mecánicas reduciendo ligeramente su ductilidad. A pesar de esta reducción, como se mencionó anteriormente estos aceros ya poseen una gran ductilidad se puede trabajar con ellos igualmente. La pega es que estos son menos económicos que los trabajados con recocido.

La resistencia de la pieza es otro factor clave que depende directamente del límite elástico característico y la resistencia última que se obtienen del límite elástico remanente del 0,2% y la resistencia a tracción. Estos valores calculados son inversamente proporcionales al espesor de la pieza.

Los aceros inoxidables, de esta forma, consiguen una gran ductilidad, tenacidad, maleabilidad y capacidad de soportar temperaturas extremas. Aunque no está permitido la galvanización de los mismos ya que provocaría la fragilización del

acero y no se recomienda soldarlos con aceros al carbono ya que podría provocar contaminación férrea.

Todas estas propiedades permiten un gran abanico de formas: placas, laminas, bobinas, ejes, barras, secciones huecas, ...con distintos tipos de conformado (cada uno escogido dadas las condiciones de la forma en cuestión.

Tampoco se debe olvidar el acabado superficial de la pieza. Ya que al ser un tipo de material diseñado para estar expuesto a ambientes corrosivos su acabado superficial se verá directamente afectado. En la mayoría de los casos el acero inoxidable proporciona un acabado superficial estéticamente llamativo y bonito a pesar de las condiciones atmosféricas adversas. A la hora de diseñar al final puede acabar siendo un factor a tener en cuenta a la hora de escoger un acero inoxidable o un acero al carbono.

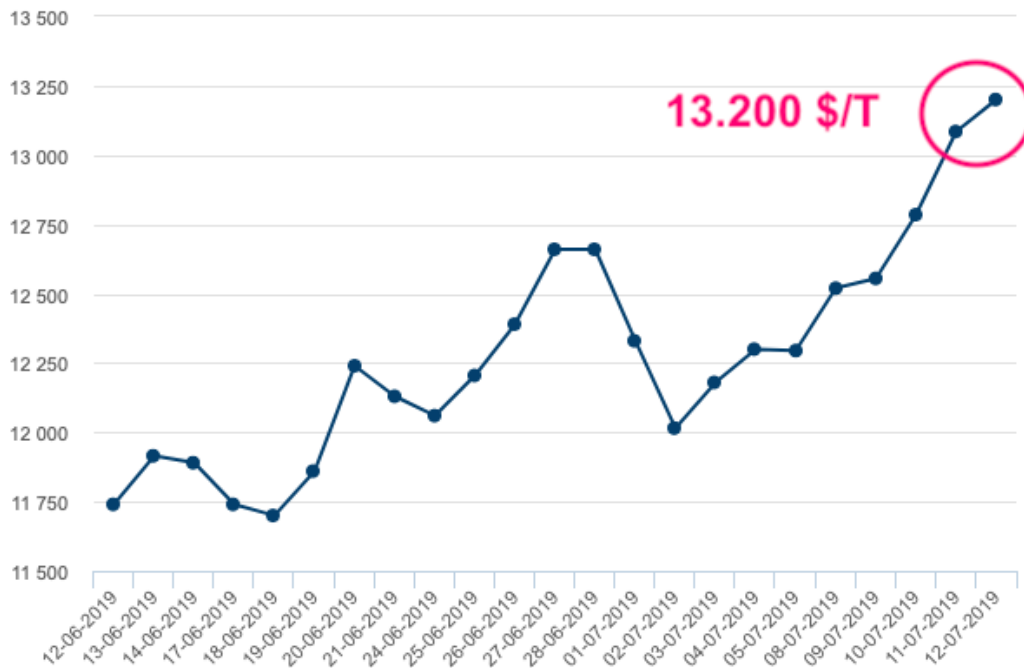
2.6 Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos forma parte de la familia de aceros inoxidables con una muy buena resistencia a la corrosión y grandes prestaciones mecánicas: ductilidad, resistencia al impacto, ... Tiene distintas aplicaciones y una de ellas es el uso como elementos estructurales en el ámbito de la construcción. Por ese motivo es una familia de aceros inoxidables a tener en cuenta en comparación al resto o al acero al carbono.

Como se ha mencionado anteriormente el principal inconveniente que tiene el acero inoxidable respecto al acero al carbono es el precio. Muchas veces se dispone de un presupuesto limitado a la hora de diseñar este tipo de obras por lo que usar estos materiales con mejores prestaciones no siempre está al alcance. Además de que sus beneficios son especialmente significantes a largo plazo lo cual genera ciertas incertidumbres sobre los mismos y realmente son muy concretos los escenarios en los que se tiene la certeza de que estos beneficios a largo plazo serán rentables.

¿Cuál es uno de los factores que influyen en la volatilidad y la variabilidad del precio del acero inoxidable en el mercado? El contenido de níquel. El níquel es un material que no tiene un precio estable en el mercado como se puede observar en la siguiente gráfica (gráfica 2.2)

LME NICKEL HISTORICAL PRICE GRAPH



Gráfica 2.2 Precio del níquel de junio a julio del 2019

Esta gráfica representa que el precio del níquel estaba en 11750 \$/T en junio de este año y subió a 13200 en cuestión de un mes. Este comportamiento inestable es bastante típico a lo largo de los años. Así que, ¿qué proporciona el acero inoxidable ferrítico respecto al resto de opciones una buena alternativa?

El acero inoxidable ferrítico a diferencia del resto no contiene níquel en sus aleaciones. El acero inoxidable austenítico (la otra familia de aceros inoxidables usados para la construcción) al final es el “preferido” pero en consecuencia el más susceptible a la volatilidad del precio del níquel.

Esta ventaja les proporciona una estabilidad de precios en el mercado lo cual es un punto favorable a la hora de definir el presupuesto del proyecto. No sólo eso, sino que también presenta un gran valor estético en aplicaciones constructivas. Ya que posee una buena resistencia mecánica (más o menos 250-330 MPa) gran durabilidad y un acabado superficial muy llamativo y atractivo lo que lo convierte en un material interesante sobre todo en aquellas obras con un carácter simbólico/estético importante en el proyecto.

3. Web crippling

3.1 Introducción

Las estructuras diseñadas con acero inoxidable tienen la gran ventaja de poder ser estructuras ligeras y esbeltas dadas sus grandes prestaciones. Sin embargo, esta ventaja puede jugar como un arma de doble filo debido a que acentúa la posibilidad de que sufran distintos fenómenos de inestabilidad: abolladuras (buckling), web crippling, ...

El 'web crippling' es un fenómeno de abolladura localizada en secciones esbeltas conformadas en frío debido a cargas concentradas o en los apoyos con tensiones muy altas.

En la siguiente figura (figura 3.1) se puede observar la diferencia que hay entre el web crippling (sección de la izquierda) y la abolladura convencional/buckling (sección de la derecha).



Figura 3.1 Web crippling (izquierda) y web buckling (derecha)

Este efecto puede producirse simultáneamente con la abolladura del alma dependiendo del tipo de sección y material que tengamos. Estos escenarios pueden llegar a reducir la capacidad portante del elemento sometido a flexión lo suficiente como para que la misma esté restringida por la resistencia de la sección al web crippling.

Las ecuaciones halladas para estudiar este fenómeno son empíricas y determinadas solamente para estructuras de acero al carbono. Esto provoca una gran limitación en la posibilidad de aplicar estas fórmulas a cualquier tipo de

sección. Concretamente, la mayor limitación es que no son directamente extrapolables a las secciones de acero inoxidable.

Las guías de diseño distinguen cuatro condiciones (estados de carga) diferenciados en los que una pieza conformada en frío puede estar sometida a web crippling

1. EOF-> External One-Flange loading (carga externa a un ala).
2. IOF -> Internal One-Flange loading (carga interna a un ala).
3. ETF -> External Two-Flanges loading (carga externa a dos alas).
4. ITF -> Internal Two-Flanges loading (carga interna a dos alas).

Si la distancia entre los bordes de las placas de carga en lados opuestos del alma es mayor que 1,5 veces la altura del alma h_w , podemos decir que se rige bajo un estado de única ala (EOF o IOF). Por el lado opuesto, si esta distancia es menor el estado será regido a dos alas (ETF o ITF).

Si la distancia desde el borde externo de la placa de carga que determina la 'bearing length' hasta el borde del elemento es menor que 1,5 veces la altura del alma h_w se puede decir que se rige en un estado de carga externa (EOF o ETF). Si esta distancia es mayor será de carga interna (IOF o ITF). En la siguiente figura (figura 3.1) queda ejemplificadas estas distintas situaciones:

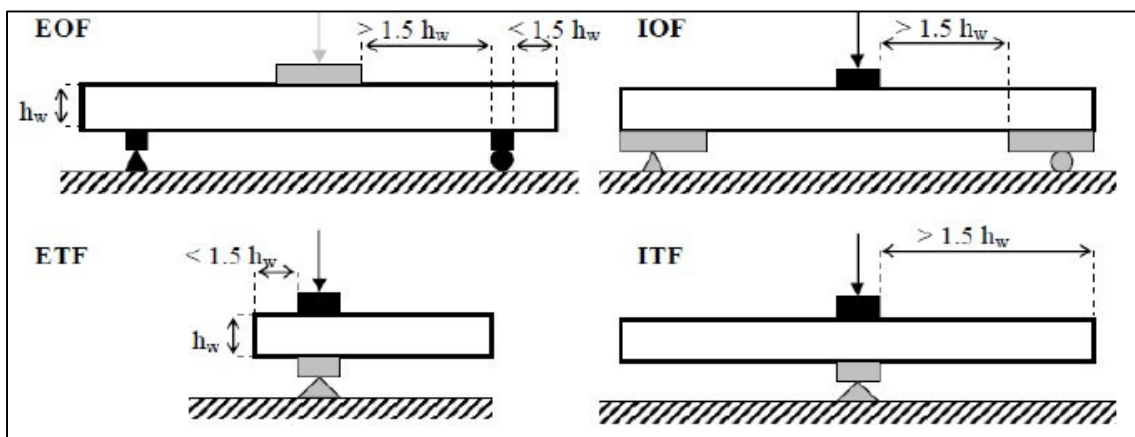


Figura 3.1. Escenarios de web crippling

Debido a la complejidad de este fenómeno en sí y la limitada aplicabilidad de sus fórmulas a cualquier tipo de acero provocó que se hayan hecho varias investigaciones y estudios al respecto para determinar cuáles son las mejores fórmulas empíricas que calculen con exactitud la carga última que puede soportar un elemento expuesto a web crippling.

3.2 Ensayos realizados para determinar la resistencia última a web crippling web estructuras de acero inoxidable:

En la siguiente tabla (tabla 3.1) se nombran los distintos ensayos realizados para estructuras de acero inoxidable sometidos a web crippling. Los primeros pasos que se realizaron en este campo fue en 1995, gracias a Korvink et al. [4] y Talja and Salmi [5] para acero inoxidable austenítico y ferrítico.

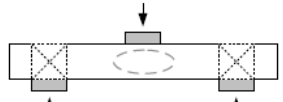
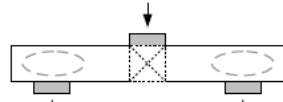
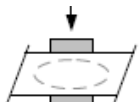
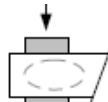
Unos años después varios investigadores que formaban parte de la misma comisión europea [12] pero de forma independiente hicieron lo mismo pero solamente para acero inoxidable austenítico entre 2004 y 2006: Talja (2004), Zilli, (2004), ...

En 2007 el grupo de investigadores Zou and Young [6] realizaron investigaciones más exhaustivas gracias a las realizadas en los últimos años. Los resultados obtenidos se han ido analizando y perfeccionando a posteriori y proponen formulaciones a tener en cuenta.

Sin embargo no fue hasta 2018 que el grupo de investigación Li and Young (2018) [7] no realizó nuevamente otras investigaciones basándose en una de las normativas convencionales existentes (NAS [10]) y nuevas metodologías.

Para la realización de este trabajo será esta última investigación junto a la realizada por Bock [8] las que serán estudiadas y tenidas en cuenta para valorar la fiabilidad de todas las propuestas existentes para estimar la resistencia a web crippling de estructuras de acero inoxidable ferrítico y austenítico.

Tabla 3.1 Ensayos realizados por los distintos autores

Tipo de ensayo	Austenítico	Dúplex	Ferrítico
 <p>One-flange interior web crippling (internal support) test (IOF)</p>	<p>Korvink et al. (1995) Talja and Salmi (1995) Talja (2004) Zilli (2004) Gardner and Nethercot (2004) Gardner et al (2006) Zhou and Young (2007) Li and Young (2018)</p>	<p>Zhou and Young (2007)</p>	<p>Korvink et al. (1995) Li and Young (2018)</p>
 <p>One-flange exterior web crippling (end support) test (EOF)</p>	<p>Korvink et al. (1995) Zhou and Young (2007) Li and Young (2018)</p>	<p>Zhou and Young (2007)</p>	<p>Korvink et al. (1995) Li and Young (2018)</p>
 <p>Two-flange interior web crippling test (ITF)</p>	<p>Korvink et al. (1995) Sélen (1999) Li and Young (2018)</p>		<p>Korvink et al. (1995) Li and Young (2018)</p>
 <p>Two-flange exterior web crippling test (ETF)</p>	<p>Korvink et al. (1995) Li and Young (2018)</p>		<p>Korvink et al. (1995) Li and Young (2018)</p>

3.3 Normativa existente

Las normas de diseño para determinar la resistencia a web crippling utilizadas para acero inoxidable son las mismas que se utilizan para acero al carbono. Por ejemplo, en la normativa del Eurocódigo cuando se habla de las expresiones

para el cálculo de la resistencia a web crippling en EN 1993-1-4 [7] te remite a las especificaciones para elementos de acero al carbono (EN 1993-1-3 [43]). En otras normativas estudiadas en este trabajo como la NAS y la ASCE sucede lo mismo cuando tenemos que buscar esas expresiones.

En este trabajo primeramente haré referencia y discutiré las distintas propuestas que propone la normativa del Eurocódigo (EC3), la North American Cold Formed Steel Specification (NAS) y la American Society of Civil Engineers Specification (ASCE).

3.3.1 Eurocódigo 3

La normativa del Eurocódigo 3 [9] explica detalladamente como utilizar las expresiones del web crippling debidamente en la Parte 1-3 que a continuación citaré textualmente:

A. Generalidades

(1) Para evitar aplastamiento, abolladura o abolladura de un alma sometida a la reacción en el apoyo o a otra fuerza local transversal aplicada a través del ala, la fuerza transversal F_{Ed} debe satisfacer:

$$F_{Ed} < R_{w,Rd} \dots (\text{eq. 3.3.1.1})$$

donde:

$R_{w,Rd}$ es la resistencia local del alma.

(2) La resistencia local de un alma $R_{w,Rd}$ se debería obtener de la siguiente forma:

a) para un alma sin rigidizar:

- para una sección transversal con una sola alma: según el apartado B;
- para cualquier otro caso, incluyendo chapa: según el apartado C;

b) para un alma rigidizada: según el apartado D.

(3) En los casos que la carga local o la reacción en el apoyo se aplique a través de un ejón que este colocado para evitar la distorsión del alma y este calculada para resistir la fuerza local transversal, no es necesario evaluar la resistencia local del alma a la fuerza transversal.

(4) En vigas con secciones transversales en forma de doble T compuestas de dos canales o con secciones transversales similares en que dos componentes están conectadas a través de su alma, las uniones entre las almas se deberían situar tan cerca de las alas de la viga como sea posible.

3.4.2 Secciones transversales con una sola alma sin rigidizar.

(1) Para secciones transversales con una sola alma sin rigidizar, véase la figura 3.2, la resistencia local transversal del alma se puede determinar cómo se especifica en el punto (2), siempre que la sección transversal satisfaga los criterios siguientes:

$$h_w / t < 200 \text{ (eq. 3.3.1.2)}$$

$$r / t < 6 \text{ (eq. 3.3.1.3)}$$

$$45^\circ < \phi < 90^\circ \text{ (eq. 3.3.1.4)}$$

donde:

h_w es la altura del alma entre las dos líneas medias de las alas;

r es el radio interior de las esquinas;

ϕ es el ángulo relativo entre el alma y a las alas [grados].

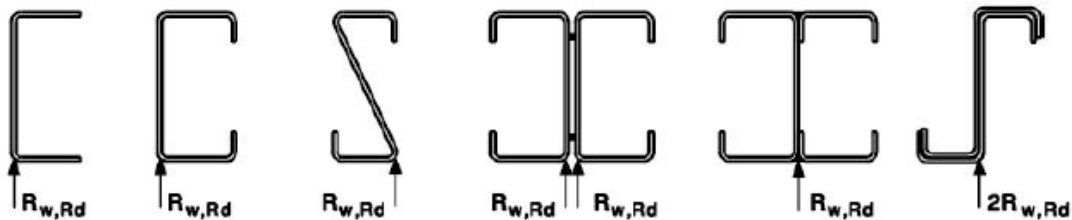


Figura 3.2. Ejemplos de secciones transversales de una sola alma

2) Para secciones transversales que satisfacen los criterios especificados en el punto (1); la resistencia local transversal de un alma $R_{w,Rd}$ se puede determinar tal como se muestra en las figuras 3.2 y 3.3.

(3) Los valores de los coeficientes k_1 a k_5 se deberían determinar tal como sigue:

$$k_1 = 1,33 - 0,33k$$

$$k_2 = 1,15 - 0,15 r/t \text{ siendo } k_2 \geq 0,50 \text{ y } k_2 \leq 1,0$$

$$k_3 = 0,6 + 0,3(f/90)^2$$

$$k_4 = 1,22 - 0,22k$$

$$k_5 = 1,06 - 0,06(r/t) \text{ siendo } k_5 \leq 1,0 \text{ y } k = f_{yb}/228 \text{ [con } f_{yb} \text{ en N/mm}^2\text{]}$$

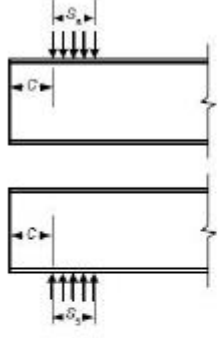
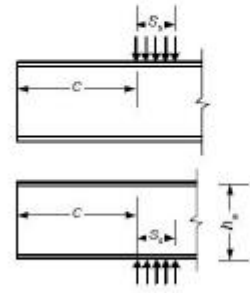
	<p>a) Para una sola fuerza local o reacción en apoyo:</p> <p>i) $c \leq 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo:</p> <p>- Para una sección transversal con alas rigidizadas:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[9,04 - \frac{h_w/t}{60} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{ec. 2.18a})$ <p>- para una sección transversal con alas sin rigidizar:</p> <p>- si $s_s/t \leq 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{h_w/t}{132} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{ec. 2.18b})$ <p>- si $s_s/t > 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{h_w/t}{132} \right] \left[0,71 + 0,015 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{ec. 2.18c})$
	<p>ii) $c > 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo:</p> <p>- si $s_s/t \leq 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{h_w/t}{49,5} \right] \left[1 + 0,007 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{ec. 2.18d})$ <p>- si $s_s/t > 60$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{h_w/t}{49,5} \right] \left[0,75 + 0,011 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{ec. 2.18e})$

Figura 3.2 Única fuerza local y apoyo

	<p>b) Para dos fuerzas locales transversales opuestas, más cercanas que $1,5 h_w$:</p> <p>i) $c \leq 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[6,66 - \frac{h_w/t}{64} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_1}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{ec. 2.18f})$
	<p>ii) $c > 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[21,0 - \frac{h_w/t}{16,3} \right] \left[1 + 0,0013 \frac{s_1}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (\text{ec. 2.18g})$

Figura 3.3 Dos fuerzas locales y apoyo

C. Secciones transversales con dos o más almas sin rigidizar.

(1) En secciones transversales con dos o más almas, incluyendo chapas, véase la figura 3.2, la resistencia local transversal de un alma sin rigidizar se debería determinar tal como se especifica en el punto (2), siempre que se satisfagan las dos condiciones siguientes:

- la distancia libre c desde la longitud de apoyo en el soporte que recibe la reacción o la distancia de una fuerza local al borde libre, véase la figura 3.3, sea al menos 40 mm;

- la sección transversal cumpla los criterios siguientes:

$$r/t < 10 \quad (\text{eq. 3.4.5})$$

$$h_w/t < 200 \cdot \sin \phi \quad (\text{eq. 3.4.6})$$

$$45^\circ < \phi < 90^\circ \quad (\text{eq. 3.4.7})$$

donde:

h_w es la altura del alma entre las dos líneas medias de las alas;

r es el radio interior de las esquinas;

ϕ es el ángulo relativo entre el alma y las alas [grados].

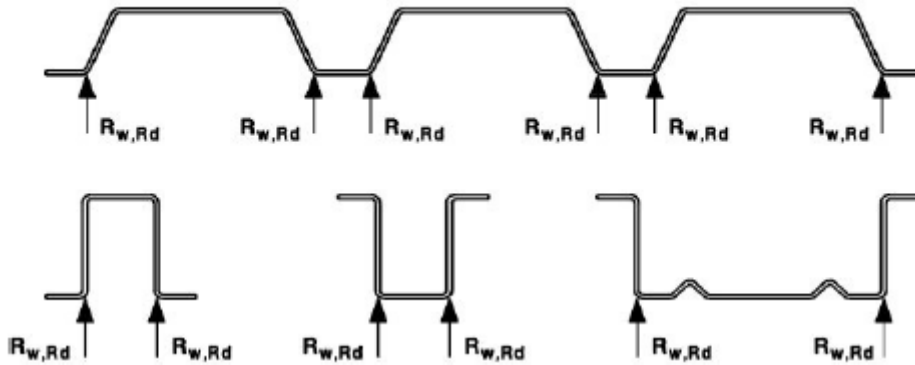


Figura 3.4 Ejemplos de secciones transversales con dos o más almas

(2) Cuando se satisfagan las dos condiciones del punto (1), la fuerza transversal local $R_{w,Rd}$ para cada alma de la sección transversal se debería determinar a partir de:

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0.1 \sqrt{r/t} \right) \left[0.5 + \sqrt{0.02 l_a / t} \right] \left[2.4 + (\phi / 90)^2 \right] / \gamma_{M1} \quad (\text{eq. 3.4.8})$$

donde:

l_a es la longitud de apoyo efectiva para la categoría pertinente, véase punto (3);

α es el coeficiente para la categoría pertinente, véase el punto (3).

(3) Los valores de l_a y α se deberían obtener de los puntos (4) y (5) respectivamente. El valor máximo de cálculo para $l_a = 200$ mm. Cuando el apoyo sea una sección de acero conformado en frío con un alma o un tubo redondo, se debería tomar un valor de 10 mm para s_s . La categoría pertinente (1 o 2) debería basarse en la distancia libre e entre la carga local y el apoyo más cercano, o la distancia libre c desde la reacción en apoyo o fuerza local a un borde libre, véase la figura 3.5.

(4) El valor de la longitud de apoyo efectiva l_a se debería obtener a partir de lo siguiente:

a) Para la Categoría 1: $l_a = 10$ mm

b) Para la Categoría 2:

- $\beta V < 0,2$: $l_a = s_s$

- $\beta V > 0,3$: $l_a = 10$ mm

- $0,2 < \beta V < 0,3$: Se interpolan linealmente entre los valores de l_a para 0,2 y 0,3 con:

$$\beta_v = \frac{|V_{Ed,1}| - |V_{Ed,2}|}{|V_{Ed,1}| + |V_{Ed,2}|}$$

donde $|V_{Ed,1}|$ y $|V_{Ed,2}|$ son los valores absolutos de los esfuerzos cortantes transversales a cada lado de la carga local o reacción en el apoyo, $|V_{Ed,1}| \geq |V_{Ed,2}|$ y s_s es la longitud del apoyo rígido.

(5) El valor del coeficiente α se debería obtener a partir de lo siguiente:

a) Para la Categoría 1:

- para chapa perfilada: $\alpha = 0,075$
- para perfiles-bandeja y secciones omega: $\alpha = 0,057$

b) Para la Categoría 2:

- para chapa perfilada: $\alpha = 0,15$
- para perfiles-bandeja y secciones omega: $\alpha = 0,115$

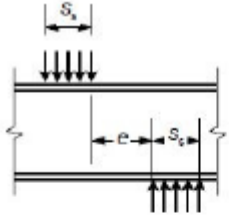
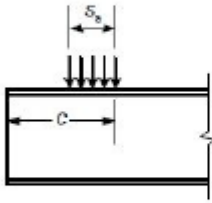
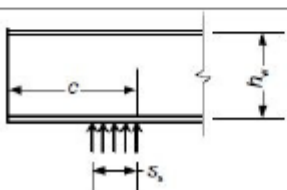
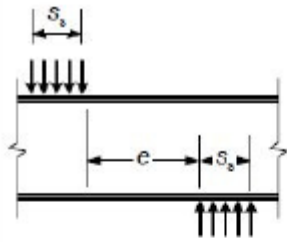
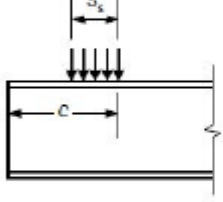
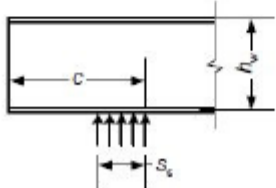
	<p>Categoría 1</p> <p>- carga local aplicada con $e \leq 1,5 h_w$ distancia libre desde el apoyo más cercano;</p>
	<p>Categoría 1</p> <p>- carga local aplicada con $c \leq 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo libre;</p>
	<p>Categoría 1</p> <p>- reacción en el apoyo extremo con $c \leq 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo libre.</p>
	<p>Categoría 2</p> <p>- carga local aplicada con $e > 1,5 h_w$ distancia libre desde el apoyo más cercano;</p>
	<p>Categoría 2</p> <p>- carga local aplicada con $c > 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo libre;</p>
	<p>Categoría 2</p> <p>- reacción en el apoyo extremo con $c > 1,5 h_w$ distancia libre desde un extremo libre;</p>

Figura 3.5 Cargas locales y apoyos

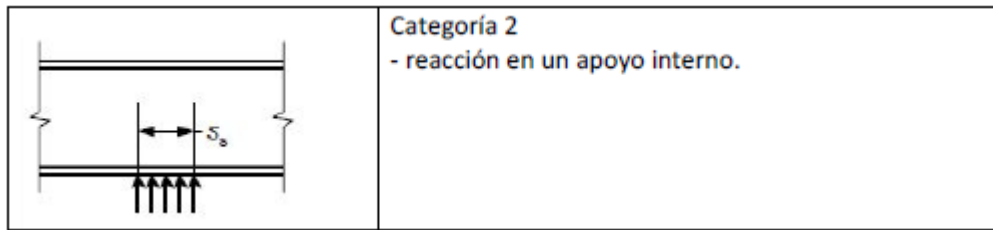


Figura 3.5 Cargas locales y apoyos

3.3.2 NAS

La otra normativa utilizada es la NAS (North American Cold-Formed Steel Specification) [10] que tiene un apartado dedicado al web: “C3.4.1 Web Crippling Strength [Resistance] of Webs without Holes”:

C3.4 Web Crippling

C3.4.1 Web Crippling Strength [Resistance] of Webs without Holes

La resistencia a web crippling del alma [resistencia], P_n , se determinará de la siguiente manera:

$$P_n = Ct^2 F_y \sin \theta \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \quad (Eq. C3.4.1-1)$$

donde:

P_n = Resistencia del alma a web crippling [resistencia]

C = Coeficiente de la tabla C3.4.1-1, C3.4.1-2, C3.4.1-3, C3.4.1-4 o C3.4.1-5

C_h = Coeficiente de esbeltez de la tabla C3.4.1-1, C3.4.1-2, C3.4.1-3, C3.4.1-4 o C3.4.1-5

C_N = Coeficiente ‘Bearing length’ de la tabla C3.4.1-1, C3.4.1-2, C3.4.1-3, C3.4.1-4 o C3.4.1-5

C_R = Coeficiente del radio interno de la tabla C3.4.1-1, C3.4.1-2, C3.4.1-3, C3.4.1-4 or C3.4.1-5

F_y = Límite elástico determinado en la sección A7.1

h = Dimensión del alma medida en el plano del alma

N = Bearing length [3/4 in. (19 mm) mínima]

R = Radio interno

t = Espesor del alma

θ = Ángulo entre el plano del alma y el plano de la superficie de apoyo, $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

Las almas de miembros en flexión para las que h / t sea superior a 200 requieren estar provistas de medios apropiados para transmitir cargas o reacciones concentradas directamente a la(s) alma(s).

P_n representa la resistencia nominal [resistencia] para la carga o reacción de una web que conecta las alas superiores e inferiores. En el caso de las almas que constan de dos o más hojas, P_n , se calculará para cada hoja individual y se agregarán los resultados añadidos para obtener la resistencia nominal de la sección completa.

La carga o reacción de un ala (EOF, IOF) se produce cuando la distancia clara entre los bordes del rodamiento de cargas o reacciones concentradas opuestas adyacentes es superior a $1,5 h$.

La carga o reacción de dos alas (ETF, ITF) se produce cuando la distancia clara entre los bordes del rodamiento de cargas o reacciones concentradas opuestas adyacentes es igual o inferior a $1,5 h$.

La carga externa se produce cuando la distancia desde el borde del rodamiento hasta el final del miembro es igual o inferior a $1,5 h$.

La carga interior ocurre cuando la distancia desde el borde del rodamiento hasta el extremo del miembro es mayor a $1.5h$, excepto que se indique lo contrario en el presente documento.

Los factores de seguridad y resistencia se proporcionan de las Tablas C3.4.1-1 a C3.4.1-5.

**TABLE C3.4.1-2
SINGLE WEB CHANNEL AND C-SECTIONS**

Support and Flange Conditions		Load Cases		C	C_R	C_N	C_h	USA and Mexico		Canada LSD ϕ_w	Limits
								ASD Ω_w	LRFD ϕ_w		
Fastened to Support	Stiffened or Partially Stiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.14	0.35	0.02	1.75	0.85	0.75	$R/t \leq 9$
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	1.65	0.90	0.80	$R/t \leq 5$
		Two-Flange Loading or Reaction	End	7.5	0.08	0.12	0.048	1.75	0.85	0.75	$R/t \leq 12$
			Interior	20	0.10	0.08	0.031	1.75	0.85	0.75	$R/t \leq 12$
Unfastened	Stiffened or Partially Stiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.14	0.35	0.02	1.85	0.80	0.70	$R/t \leq 5$
			Interior	13	0.23	0.14	0.01	1.65	0.90	0.80	
		Two-Flange Loading or Reaction	End	13	0.32	0.05	0.04	1.65	0.90	0.80	$R/t \leq 3$
			Interior	24	0.52	0.15	0.001	1.90	0.80	0.65	
	Unstiffened Flanges	One-Flange Loading or Reaction	End	4	0.40	0.60	0.03	1.80	0.85	0.70	$R/t \leq 2$
			Interior	13	0.32	0.10	0.01	1.80	0.85	0.70	$R/t \leq 1$
		Two-Flange Loading or Reaction	End	2	0.11	0.37	0.01	2.00	0.75	0.65	$R/t \leq 1$
			Interior	13	0.47	0.25	0.04	1.90	0.80	0.65	

Esta es la única tabla que nos concierne ya que hace referencia a los datos disponibles para realizar los cálculos necesarios.

3.3.3 ASCE

Y la última normativa generalmente utilizada es la ASCE (American Society of Civil Engineers) [11] la cual tiene un apartado para estudiar el web crippling en estructuras de acero al carbono: “3.3.4 Web Crippling Strength”.

TABLE 2. Nominal Web Crippling Strength, P_n

		Shapes Having Single Webs		I-Sections or Similar Sections ^a
		Stiffened or partially stiffened flanges	Unstiffened flanges	Stiffened, partially stiffened, and unstiffened flanges
Opposing loads spaced $> 1.5h^b$	End reaction ^c	Eq. 3.3.4-1	Eq. 3.3.4-2	Eq. 3.3.4-3
	Interior reaction ^d	Eq. 3.3.4-4	Eq. 3.3.4-4	Eq. 3.3.4-5
Opposing loads spaced $\leq 1.5h^e$	End reaction ^c	Eq. 3.3.4-6	Eq. 3.3.4-6	Eq. 3.3.4-7
	Interior reaction ^d	Eq. 3.3.4-8	Eq. 3.3.4-8	Eq. 3.3.4-9

^a I-sections made of two channels connected back-to-back, or similar sections which provide high degree of restraint against rotation of web (such as I-sections made by welding two angles to channel).

^b At locations of one concentrated load or reaction acting either on top or bottom flange, when clear distance between bearing edges of this and adjacent opposite concentrated loads or reactions is greater than $1.5h$.

^c For end reactions of beams or concentrated loads on end of cantilevers when distance from edge of bearing to end of beam is less than $1.5h$.

^d For reactions and concentrated loads when distance from edge of bearing to end of beam is equal to or greater than $1.5h$.

^e At locations of two opposite concentrated loads or of concentrated load and opposite reaction acting simultaneously on top and bottom flanges, when clear distance between their adjacent bearing edges is equal to or less than $1.5h$.

Para este estudio son necesarias las formulas referentes a “Shapes Having Single Webs” -> “Stiffened or partially stiffened flanges”. Siendo la ecuación “Eq. 3.3.4-1” referente a EOF, “Eq 3.3.4-4” referente a IOF, “Eq 3.3.4-6” referente a ETF” y “Eq 3.3.4-8” referente a ITF:

$$t^2 C_1 C_2 C_\theta \times \left(771 - 2.26 \frac{h}{t} \right) \times \left(1 + 0.0013 \frac{N}{t} \right) \times C_t \quad (3.3.4-8)$$

$$t^2 C_3 C_4 C_\theta \times \left(244 - 0.57 \frac{h}{t} \right) \times \left(1 + 0.01 \frac{N}{t} \right) \times C_t \quad (3.3.4-6)$$

$$t^2 C_1 C_2 C_\theta \left(538 - 0.74 \frac{h}{t} \right) \times \left(1 + 0.007 \frac{N}{t} \right) \times C_t \quad (3.3.4-4)$$

when $\frac{N}{t} > 60$, the factor $\left(1 + 0.007 \frac{N}{t} \right)$

may be increased to $\left(0.75 + 0.011 \frac{N}{t} \right)$

$$t^2 C_3 C_4 C_\theta \left(331 - 0.61 \frac{h}{t} \right) \times \left(1 + 0.01 \frac{N}{t} \right) \times C_t \quad (3.3.4-1)$$

In these formulas:

ϕ_w = resistance factor for web crippling;

P_n = nominal strength for concentrated load or reaction per web (kips for US Customary Units and N for SI units)

C_t = 1.0 for US Customary Units

C_t = 6.9 for SI Units

$$C_1 = (1.22 - 0.22k)k, \text{ when } F_y/(91.5C_t) \leq 1.0 \quad (3.3.4-10)$$

$$= 1.69 \text{ when } F_y/(91.5C_t) > 1.0$$

$$C_2 = \left(1.06 - \frac{0.06R}{t}\right) \leq 1.0 \quad (3.3.4-11)$$

$$C_3 = (1.33 - 0.33k)k \text{ when } F_y/66.5C_t \leq 1.0$$

$$= 1.34 \text{ when } F_y/66.5C_t > 1.0 \quad (3.3.4-12)$$

$$C_4 = (1.15 - 0.15R/t) \leq 1.0 \text{ but not less than } 0.50 \quad (3.3.4-13)$$

$$C_5 = (1.49 - 0.53k) \geq 0.6 \quad (3.3.4-14)$$

$$C_6 = 1 + \frac{h/t}{750}, \text{ when } h/t \leq 150 \quad (3.3.4-15)$$

$$= 1.20, \text{ when } \frac{h}{t} > 150 \quad (3.3.4-16)$$

$$C_7 = 1/k \text{ when } \frac{h}{t} \leq 66.5 \quad (3.3.4-17)$$

$$= \left(1.10 - \frac{h/t}{665}\right)\left(\frac{1}{k}\right) \text{ when } \frac{h}{t} > 66.5 \quad (3.3.4-18)$$

$$C_8 = \left(0.98 - \frac{(h/t)}{865}\right)\left(\frac{1}{k}\right) \quad (3.3.4-19)$$

$$C_9 = 0.7 + 0.3\left(\frac{\theta}{90}\right)^2 \quad (3.3.4-20)$$

F_y = specified yield strength in longitudinal compression, (ksi for US Customary Units and MPa for SI Units)

h = depth of flat portion of web measured along plane of web.

$$k = \frac{F_y}{33C_t} \quad (3.3.4-21)$$

$$\begin{aligned} m &= \#0.075 \text{ for US Customary Units} \\ &= \#1.91 \text{ for SI Units} \end{aligned} \quad (3.3.4-22)$$

t = web thickness.

N = actual length of bearing. For case of two equal and opposite concentrated loads distributed over unequal bearing lengths, smaller value of N shall be taken;

R = inside bend radius;

θ = angle between plane of web and plane of bearing surface $\geq 45^\circ$, but not more than 90° .

In the above formulas the units of h , t , N , and R are in inches and in mm for US Customary Units and SI Units, respectively.

Todos estos parámetros mostrados con anterioridad son datos conocidos por nuestras muestras de acero inoxidable ya que dependen de las características mecánicas y geométricas de nuestra pieza.

3.4 Propuestas y estudios realizados

Debido a que estas normativas se centraban solamente en estructuras de acero al carbono distintos investigadores fueron proponiendo nuevas fórmulas en base a datos experimentales. En este trabajo me centraré en dos investigaciones distintas: El trabajo de Li and Young (2018) en el que se hizo una propuesta para mejorar la fórmula de la normativa NAS y la tesis doctoral de Marina Bock (2014) en la que se presentó una propuesta para mejorar la fórmula del Eurocódigo y una serie de análisis con modelos numéricos para proponer una nueva fórmula en base a las inestabilidades producidas y reflejadas en una gráfica esbeltez- χ .

3.4.1 Li and Young [7]

En el artículo (Li and Young, 2019), titulado “Web crippling of cold-formed ferritic stainless steel square and rectangular hollow sections”, los autores presentan una serie de datos experimentales como resultados obtenidos por modelizaciones numéricas con Abaqus para proponer una nueva fórmula. Esta

nueva propuesta está basada en recalibrar los coeficientes utilizados en la normativa NAS (C , C_r , C_N , C_h) para los 4 casos distintos (EOF, IOF, ETF, ITF).

Table 7
Coefficients for high-strength austenitic and duplex stainless steels proposed by Zhou and Young [10].

Load cases	C	C_r	C_N	C_h
EOF	5	0.40	0.50	0.020
IOF	7	0.21	0.26	0.001
ETF	3	0.36	0.50	0.020
ITF	7	0.11	0.24	0.001

Note: The above coefficients apply when $h/t \leq 50$, $r/t \leq 2$, $N/t \leq 54$, $N/h \leq 2$ and $\theta = 90^\circ$.

En base a estos nuevos coeficientes realizan una serie de comparaciones entre las distintas normativas para valorar cual va mejor en cada escenario adjuntando tablas y gráficas.

También realizaron dos nuevas propuestas. La segunda se basó en la primera, estudiando los resultados obtenidos buscaron mejorarlos más aún ya que consideraron que no eran del todo eficientes en algunos de los escenarios. La tercera propuesta es independiente de las normativas convencionales y la llaman “Direct Strength Method” y busca estimar la resistencia última de piezas conformadas en frío a partir de otro procedimiento distinto para ver si es mejor o no que las normativas convencionales.

El procedimiento para realizar esta última propuesta es explicado detalladamente en la sección correspondiente a las propuestas que yo realizaré a posteriori para algunos de los escenarios.

Todas estas propuestas pueden utilizarse en cualquiera de los 4 escenarios lo cual dota a este artículo una buena versatilidad y unas buenas aproximaciones que serán enseñadas en secciones posteriores.

3.4.2 Bock [8]

Otra referencia importante para este trabajo es la tesis doctoral de Bock (2014) titulada “Web crippling and local buckling response of stainless steel sections”. La primera parte de dicho estudio es muy similar al realizado por Li and Young pero en vez de hacer una nueva propuesta en base a la normativa NAS lo hace con la normativa del Eurocódigo. Su propuesta añade unos nuevos coeficientes

a la fórmula de la normativa teniendo en cuenta la variabilidad que no es tenida en cuenta en las estructuras de acero al carbono.

Además, hace un análisis complementario valorándola resistencia a web crippling como una reducción de la resistencia plástica inicial ya que considera el web crippling como una inestabilidad. Este análisis sirve para hacer unas propuestas alternativas para “hat sections”. La desventaja de estas propuestas es que han sido calibradas sólo para EOF e IOF.

Coefficient	Category 1 (EOF)		Category 2 (IOF)	
	SHS/RHS	Hat section	SHS/RHS	Hat section
α	0.07	0.085	0.13	0.14
β	2.14	1.65	0.59	0.81
δ	0.22	0.13	0.14	0.065
ξ	2200	2275	2700	2000

$$R_{w,Rd} = n_w \alpha t^2 \sqrt{\sigma_{0.2} E} (\xi \sigma_{1.0} / E)^k \sqrt{\beta t / r} \left(0.5 + \sqrt{0.01 l_a / t} \right) (2.4 + (\phi / 90)^2) / \gamma_{M1} \quad (2.6)$$

where

$$k = \delta r / t$$

and l_a must be taken as: $l_a = 0.01 s_s$ for Category 1 and $l_a = 2.2 s_s$ for Category 2

Figura 3.6 Coeficientes y formula usadas por el Eurocódigo

Además de realizar esta primera propuesta, propone una nueva formulación que es independiente de resto de normativas convencionales. Utiliza la misma metodología usada por Li and Young pero partiendo de hipótesis ligeramente diferentes y usando distintos datos tanto experimentales como modélicos. Por lo cual, las formulas (aunque visualmente son parecidas entre sí ya que siguen el “Direct Strength Method”) no usan los mismos coeficientes y cambian algunos parámetros.

Estas son las fórmulas utilizadas por Bock (2014) para esta nueva propuesta:

Summary of the proposed method

1. Determine $R_{w,pl}$ and $R_{w,cr}$:

$$R_{w,pl} = \frac{M_{pl,ly} l_y}{r}$$

$$R_{w,cr} = k_F \frac{\pi^2 E t^3}{12(1 - \nu^2) h}$$

$$M_{pl,ly} = \frac{\sigma_{0.2} t^2}{4}$$

$$k_F = \begin{cases} 4.9 - 1.6(b/h) - 0.006(L/h)^2 + 6.6(s_s/L) & \text{For IOF} \\ 1.85 - 0.75(b/h) + 1.75(s_s/h) & \text{For EOF} \end{cases}$$

$$l_y = \begin{cases} (s_s + h)m[2r/t + 5b/L - 0.55] & \text{For IOF} \\ (s_s + h/2)m[2.2 - 6.2\sqrt{r^2 + t^2}/t + 6.3r/t + 0.6L/e] & \text{For EOF} \end{cases}$$

$$m = 1 \text{ For ferritics}$$

$$m = 1.15 \text{ For austenitics}$$

2. Obtain the slenderness:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{R_{w,pl}}{R_{w,cr}}}$$

3. Obtain the reduction factor χ

For IOF:

$$\chi = \frac{0.29}{\bar{\lambda}^{0.82}}$$

For EOF:

$$\chi = \frac{0.32}{\bar{\lambda}^{0.82}}$$

4. Ultimate web crippling resistance:

$$R_{w,u} = \chi R_{w,pl}$$

Figura 3.7 Formulas usadas por Bock (2014)

Al igual que en el resto de normativas existen formulaciones concretas diferencias para los casos de carga interna y externa que en esta ocasión son k_F y l_y . Los datos experimentales utilizados para este estudio son para acero inoxidable ferrítico en los que que la m es igual a 1 y no se dispone d einformación relativa a otros aspectos o detalles del ensayo necesarios para aplicar determinadas expresiones de diseño, por ese motivo se ha decidido utilizar los datos especificados por Bock en su artículo en el apartado “4.3.5. Cross-section geometries and load configurations for the parametric study”:

“For all these geometries, the length of the member L , the bearing plate s_s , and the support plates S , were 400 mm, 25 mm and 50 mm respectively. Regarding the clear distance e for the EOF loading, this was set out as $e=75$ mm.”

4. Estudio experimental y comparativo

Con toda esta información recopilada se realizará un análisis de cada una de las formulas gracias a los datos experimentales obtenidos por Li and Young (2018). Este análisis me servirá para ejemplificar de forma numérica e intuitiva las ventajas y desventajas de cada una de las propuestas.

Para comparar de forma lo más objetiva posible las distintas normativas se tendrán en cuenta dos factores: la media y la desviación estándar. Gracias a los datos experimentales es posible obtener la resistencia última a web crippling de cada una de las distintas formulaciones. Lo ideal sería que el ratio entre el resultado empírico obtenido por test de laboratorio y el resultado obtenido por la normativa sea equivalente a 1. Pero eso es imposible, por lo cual el objetivo de las mismas es que la media de todos los ratios obtenidos sea lo más próximo a 1. Y además que dichos datos estén por el lado de la seguridad ($\text{ratio} > 1$).

Sin embargo, aunque los resultados no den estrictamente lo más próximo a 1 dentro de las posibilidades sería útil comparar la media obtenida con el factor de seguridad propuesto por la normativa europea para determinar la fiabilidad que dan unos resultados en cuanto a resistencia última. Y ese factor de seguridad es equivalente a 1,1; por lo cual, el objetivo primordial será obtener una media de los ratios comprendido entre 1 y 1,1.

En cuanto a las desviaciones estándar la meta principal es que los datos obtenidos por las formulaciones de las normativas no estén demasiado dispersos entre sí. Ya que una propuesta puede dar buenas medias, pero si luego la desviación estándar es alta esos resultados no son fiables. Porque seguramente habrá un buen número de valores por el lado de la inseguridad y el resto (que son los valores realmente útiles) darán una media superior a la obtenida anteriormente. Por eso mismo, la intención es que la desviación estándar sea como mínimo lo más próxima a 0,2 (y si da inferior a 0,2 mejor aún).

Los datos experimentales necesarios para la realización de este trabajo son los ejecutados por Li and Young (2018) como se especificó en el apartado 3.2 del mismo. Estos conjuntos de datos serán descritos detalladamente en la sección de los anejos al final del trabajo en las tablas 9.1, 9.2, 9.3 y 9.4.

4.1 Propuesta Eurocódigo 3

A continuación se presenta la gráfica de los resultados experimentales comparados con la aplicación de la formulación de Eurocódigo para los 4 casos de carga analizados.

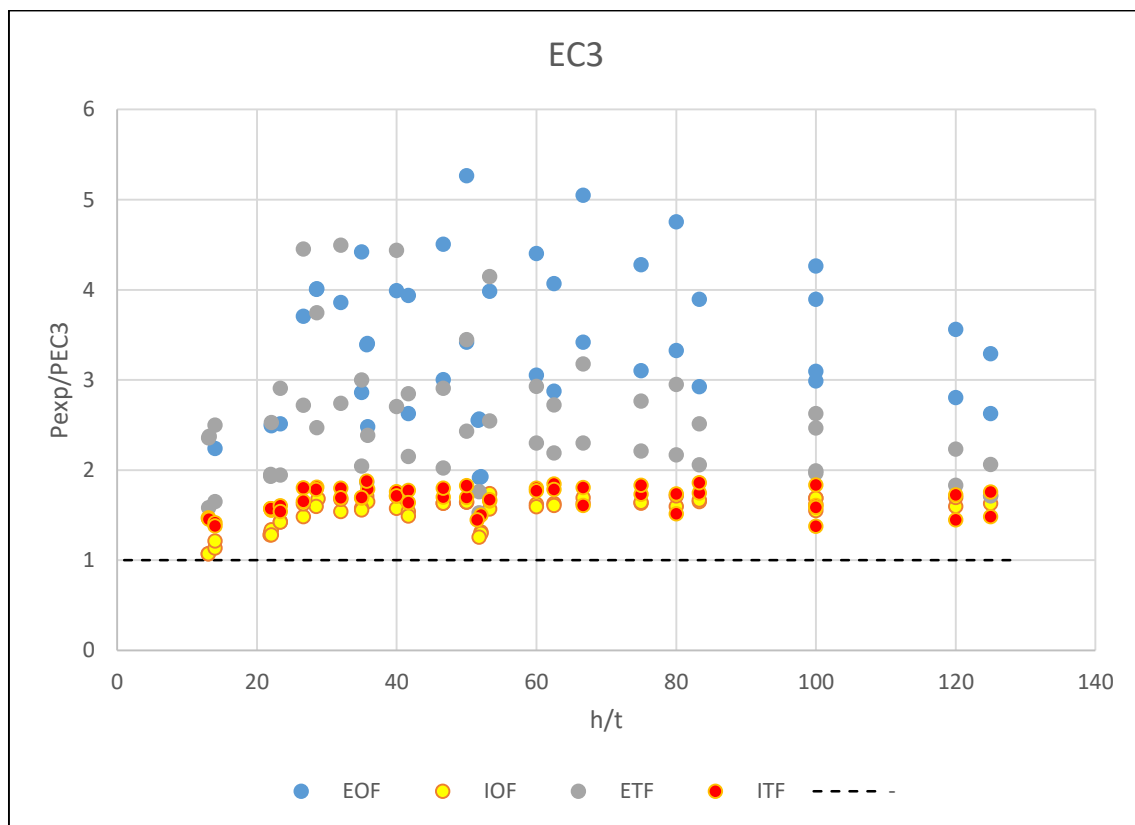


Figura 4.1 Resultados comparativos del Eurocódigo

En la gráfica 4.1 se aprecia cómo las propuestas de Eurocódigo para los casos de IOF y ITF ajustan mejor los resultados experimentales que las otras dos.

Si se realiza una valoración estadística de los resultados (Tablas 9.5, 9.6, 9.7, 9.8; Anejos), se obtiene que los ratios promedios equivalen a 3,36(EOF); 1,46(IOF); 2,53(ETF) y 1,58(ITF).

No hay homogeneidad entre los 4 casos ya que por ejemplo algunos de los ratios de ETF cuádruplican aproximadamente los obtenidos para IOF. Esto proporciona resultados 'utilizables', ya que el factor de seguridad es bastante elevado sobre todo para ETF. Por no hablar de que para los escenarios de carga externa los

datos están muy dispersos, concretamente con una desviación estándar de 0,81 y 0,78 para EOF y ETF respectivamente.

Pero precisamente por ese mismo motivo esta fórmula es muy mejorable ya que el ratio resultado experimental/resultado EC3 es excesivamente alto (mayor a 1,5 en la gran mayoría de las muestras) y nos quedamos demasiado por el lado de la seguridad lo que equivaldría en una gran inversión económica a la hora de proyectar. Es posible obtener resultados válidos igualmente mucho más aproximados a los resultados reales.

4.2 Propuesta NAS

Para el caso de la aplicación de la norma NAS, los resultados de la figura (gráfica 4.2) y muestran como los valores para IOF and ITF están del lado de la inseguridad en comparación con los ensayos utilizados en este trabajo.

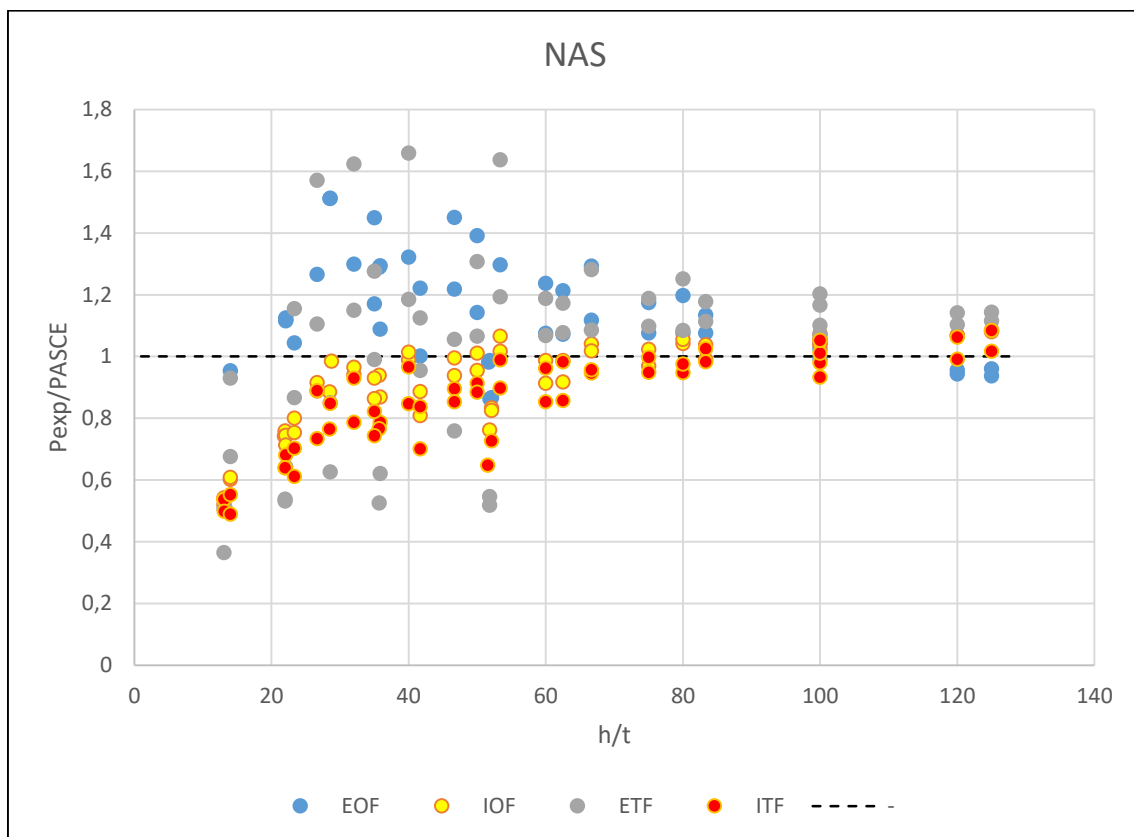


Figura 4.1 Resultados comparativos de la NAS

Para la NAS los ratios promedios son 1,14(EOF), 0,91(IOF), 1,01(ETF) y 0,79(ITF). A diferencia del Eurocódigo los resultados sí que tienen cierta homogeneidad ya que los resultados acaban formando una zona más o menos definida con forma de embudo en la gráfica, ensanchándose para ratios h/t menores a 60 y estrechándose para ratios h/t mayores a 60.

Cabe destacar que en el escenario ETF a pesar de que es el escenario que proporciona un mejor promedio es el que da resultados más dispersos entre sí y en consecuencia menos fiables. Por ejemplo, algunos promedios son mayores a 1,6 y otros apenas llegan a 0,6 (un orden de magnitud unas cuatro veces mayor). Eso provoca que, en consecuencia, mientras que la desviación estándar del resto de escenarios ronda aproximadamente el 0,15 para ETF esta desviación estándar equivale a 0,31.

También es importante recalcar que en los escenarios ITF e IOF casi todos sus resultados están del lado de la inseguridad ya que los promedios son menores a 1 y siguen más o menos la misma dirección en la gráfica. El único escenario que da resultados medianamente fiables y acertados es EOF.

Sería útil una nueva propuesta que solucionase tanto la dispersión en los resultados como una reducción de dichos promedios.

4.3 Propuesta ASCE

A primera vista por la figura 4.3 da la sensación de que son resultados muy parecidos a los obtenidos por la NAS ya que ambas tienen formas bastante similares.

Sin embargo, es necesario destacar ciertas diferencias y puntualizaciones.

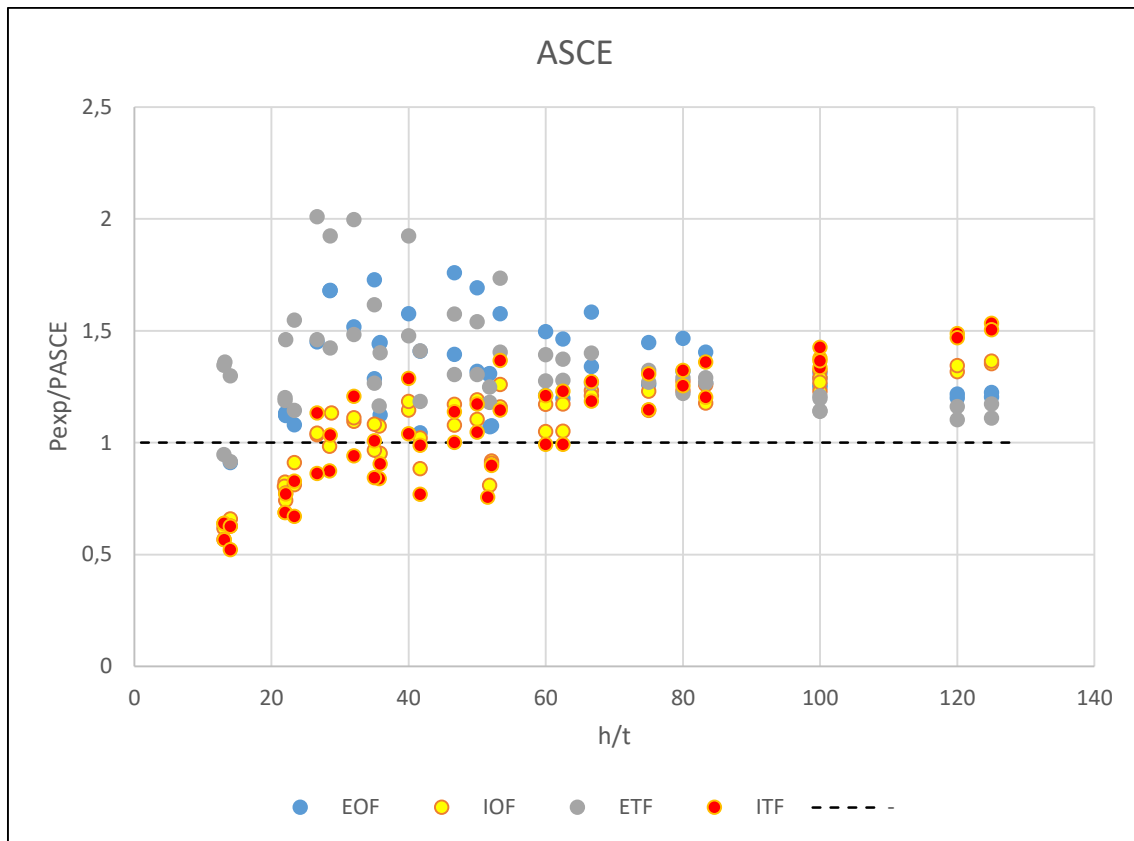


Figura 4.2 Resultados comparativos de la ASCE

Para la normativa ASCE tras analizar los resultados de las tablas mencionadas de los anejos en la gráfica 4.3 se puede mostrar que los ratios promedios obtenidos son 1,33(EOF), 1,06(IOF), 1,35(ETF) y 1,05(ITF). Vuelve a suceder lo mismo que con la normativa NAS, hay cierta homogeneidad en los resultados y acaban originando una “mancha” con forma de diábolo en la gráfica donde la zona más estrecha está (aproximadamente): $80 < h/t < 100$.

Sin embargo, el caso ITF e IOF sufren el mismo problema que el caso ETF en la normativa NAS: en la gráfica se puede observar claramente que los resultados de ambos escenarios siguen una dirección muy similar y son los que proporcionan mejores promedios, muy próximos a 1. Pero a la hora de interpretar la gráfica vemos que los resultados tienen una gran dispersión ya que para ratios h/t bajos nos quedamos por debajo del lado de la seguridad y para ratios h/t altos sucede justo lo contrario.

Para los otros dos casos vuelve a suceder lo mismo, ambos resultados están concentrados en la misma zona, pero con una gran dispersión de resultados. Al menos en estos dos casos sí que nos quedamos por el lado de la seguridad ya que el promedio resultado experimental/resultado ASCE son mayores que 1 (excepto dos resultados experimentales).

En el mejor de los escenarios (en cuanto a dispersión de valores) es EOF con una dispersión de 0,2; la cual ya está por encima de la dispersión óptima. Para esta normativa sería también recomendable una propuesta más acertada que redujera la dispersión de resultados para los casos de carga interna y/o redujera el promedio para los casos de carga externa.

4.4 Propuesta Li and Young (2018)

Valorando la figura (gráfica 4.4) presentada a continuación se puede observar que los resultados obtenidos distan bastantes de los que se consiguen con las normativas convencionales.

Por lo que es importante explicar detalladamente cada uno de los escenarios.

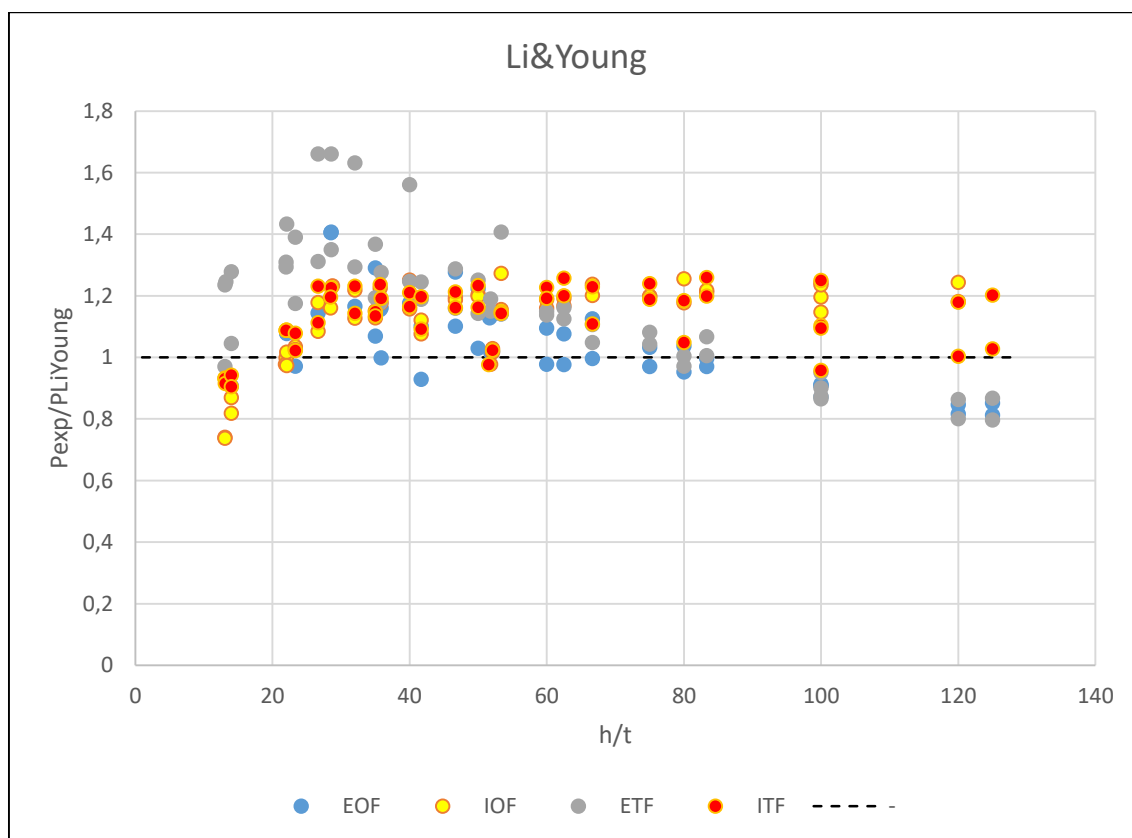


Figura 4.3 Resultados comparativos por Li and Young

En la nueva propuesta mejorada de la NAS se obtienen unos ratios promedios de 1,05(EOF), 1,06(IOF), 1,17(ETF), 1,12(ITF). A comparación de los resultados

obtenidos por la normativa NAS mencionados anteriormente esta nueva propuesta es mucho mejor que la de la normativa.

Los resultados también presentan cierta homogeneidad y están concentrados entre los promedios 1,4 y 0,8 (a pesar de que hay dos resultados experimentales que se escapan).

Soluciona notablemente la problemática mencionada para el escenario ETF donde había una gran dispersión entre los resultados ya que la mayoría de resultados oscilan entre el ratio de 1 y 1,2. Tanto IOF como ITF vuelven a ser muy similares entre ellos pero en este caso los ratios están por encima del lado de la seguridad.

En el caso de EOF dan resultados muy parecidos a los obtenidos por la normativa NAS pero estas veces algunos de los ratios están por debajo del lado de la seguridad. Sin embargo, la mayoría de ellos son fiables y acertados. Concretamente para ETF la desviación estándar sí que da 0,2 (un poco mayor que la óptima). Aun así los ratios son bastante buenos y en el resto de escenarios la desviación estándar oscilan el valor de 0,1.

En los 4 escenarios posibles los promedios dan valores muy buenos que se acercan mucho a los resultados experimentales y con una dispersión de los mismos mucho más controlada que en las normativas convencionales

Por todo esto, esta nueva propuesta es mucho más recomendable que las sugeridas por las guías de diseño “convencionales” si buscamos determinar la resistencia de una estructura de acero inoxidable (ferrítico). Aún así, en el estudio de Li and Young se considera que para EOF, IOF y ETF los resultados distan de los ideales debido a su dispersión de resultados. Por ello, más adelante propone otras dos propuestas que comentaré y analizaré más adelante.

4.5 Propuestas Bock:

4.5.1 Propuesta basada en el Eurocódigo

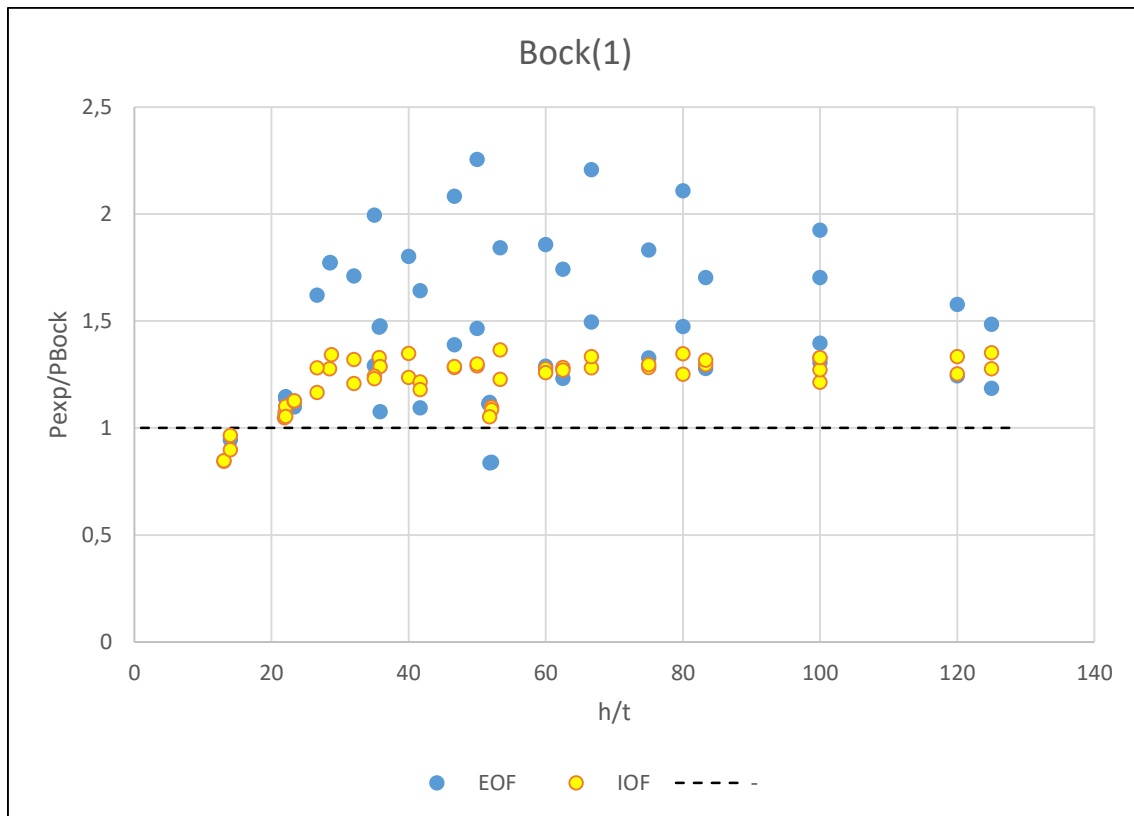


Figura 4.5.1 Resultados comparativos por la primera propuesta de Bock

En esta primera propuesta presentada por Bock el ratio promedio de cada uno de los 2 escenarios son 1,48 (EOF) y 1,21 (IOF) tras analizar las tablas 9.5 y 9.6.

Esta nueva fórmula tenía como objetivo mejorar la propuesta de la normativa presentada por el Eurocódigo para los escenarios EOF e IOF. Y dicho objetivo se cumple ya que el principal problema que había en la normativa EC3 es que los ratios eran muy superiores a 1. En la propuesta de Bock estos ratios promedios disminuyen significativamente.

A pesar de ello, la propuesta sigue teniendo ciertos inconvenientes. No es aplicable para escenarios de “dos alas” como lo pueden ser el resto de propuestas. Además, tenemos una dispersión alta para el escenario EOF, concretamente una desviación estándar equivalente a 0,36. También hay que añadir que aunque los resultados obtenidos son mejores respecto las normativas EC3, NAS y ASCE la propuesta realizada por Li and Young sigue siendo ligeramente mejor ya que el ratio promedio es aún más cercano a 1.

4.5.2. Propuesta basada en Direct Strength Method

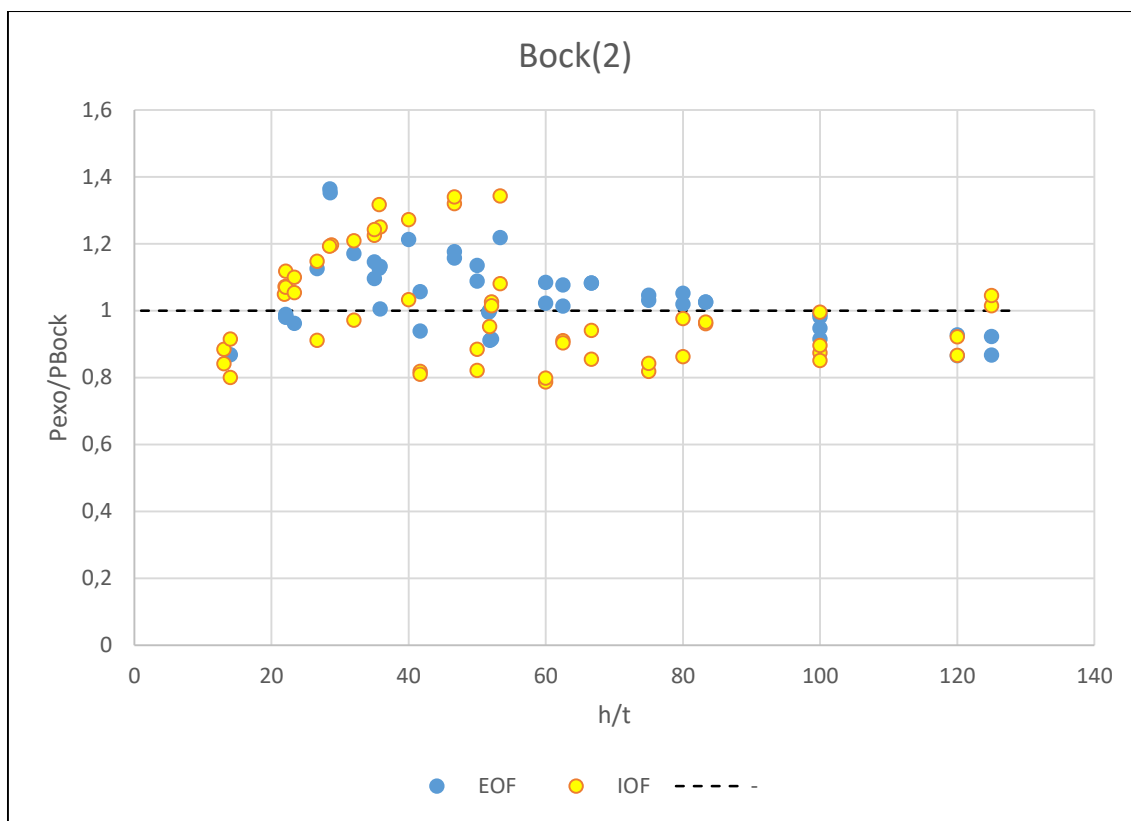


Figura 4.5.2 Resultados comparativos de la segunda propuesta de Bock

Esta segunda propuesta era independiente a recalibrar o reformular los parámetros de las normativas conocidas. La descripción de esta propuesta será explicada en la sección correspondiente a las nuevas propuestas. Los nuevos ratios promedios obtenidos con esta nueva aproximación son 1,04 (EOF) y 1,006 (IOF). Estos resultados también están disponibles en las tablas 9.5 y 9.6 de la sección 9.Anejos.

Sigue teniendo la misma desventaja que su primera propuesta, sólo es válida para EOF y IOF. Igualmente, esta serie de fórmulas son muy recomendables de utilizar ya que dan valores de ratio promedio muy similares a 1 y su gran mayoría con una desviación máxima del 20% (0,8 o 1,2). Además, la desviación estándar se redujo considerablemente para el escenario EOF (respecto a su primera propuesta) con una desviación estándar de 0,11.

En comparación al resto de normativas “convencionales” esta propuesta es notablemente mejor y da resultados muy similares a la propuesta realizada por Li and Young.

5. Recomendación inicial

Una vez analizados los resultados comparativos entre los valores experimentales y la aplicación de las diferentes propuestas de diseño de las normativas o de los autores estudiados, se puede concluir que la mejor recomendación para los diferentes escenarios es la siguiente:

EOF: Bock/ Li and Young.

IOF: Bock/ Li and Young.

ETF: Li and Young.

ITF: Li and Young.

6. Propuestas alternativas y estudio de la metodología “Direct Strength Method”

En base a todo este análisis comparativo realizado entre las distintas normativas y propuestas para los 4 escenarios distintos a los que puede verse sometida una muestra de acero inoxidable (ferrítico), se realizan a continuación varias propuestas teniendo en cuenta las distintas desventajas mencionadas de lo que ya conocemos.

Primeramente, se buscarán 2 formulaciones distintas utilizando el método usado por Bock pero para los dos casos no estudiados: External Two Flanges e Internal Two Flanges.

Teniendo en cuenta que las propuestas presentadas hasta la fecha por Bock o por Li and Young ya ajustan considerablemente bien los resultados experimentales, en este apartado se ha decidido buscar 4 formulaciones distintas para mejorar las formulas propuestas por la normativa ASCE. El problema que tenía esa propuesta era su dispersión de valores y unos ratios promedio no excesivamente cercanos a 1 para lo que nos gustaría.

De esta forma, serían 6 las nuevas propuestas para los 4 escenarios posibles.

6.1 Propuestas basadas en el “Direct Strength Method”

Para realizar esta propuesta se valorarán las mismas hipótesis que utilizó Bock para su segunda propuesta y Li and Young para la tercera. Solamente se mostraron las fórmulas utilizadas por Bock para la segunda propuesta pero no se explicó el procedimiento realizado para obtenerlas ya que era más útil hacerlo en esta sección.

Simplemente por el mero hecho de que estas propuestas no tienen nada que ver con las estudiadas y comparadas en secciones anteriores (EC3, NAS y ASCE), por lo cual, resulta más cómodo y claro dedicarle una sección aparte del resto. Ya que además servirá para explicar las 3 propuestas diferentes utilizando esta metodología (Ben Young, Bock y la nueva propuesta).

A continuación se describe el proceso de obtención utilizado por Bock para el desarrollo de la propuesta presentada en el capítulo 3.4.2 de este trabajo.

Bock se basó en la hipótesis de que la resistencia última de una probeta (en este caso, de acero inoxidable, expresada como $R_{w,u}$) se puede estimar como la resistencia plástica del mismo (expresada como $R_{w,pl}$) por un factor reductor conocido como “Ji” (χ) de tal forma que:

$$R_{w,u} = \chi \cdot R_{w,pl} \quad (\text{eq. 6.1.1})$$

La resistencia plástica del material la podemos conocer a partir de los datos experimentales de los ensayos de caracterización del material, multiplicando por las características geométricas de la sección. Por lo tanto, la incógnita más determinante en este análisis es χ (factor de reducción=.

El punto clave es que la estimación de este factor de reducción se obtiene a partir de hacer un análisis numérico detallado utilizando la gráfica esbeltez (λ)- χ que tiene la siguiente forma preestablecida para cualquier estructura de acero inoxidable en la figura 6.1.

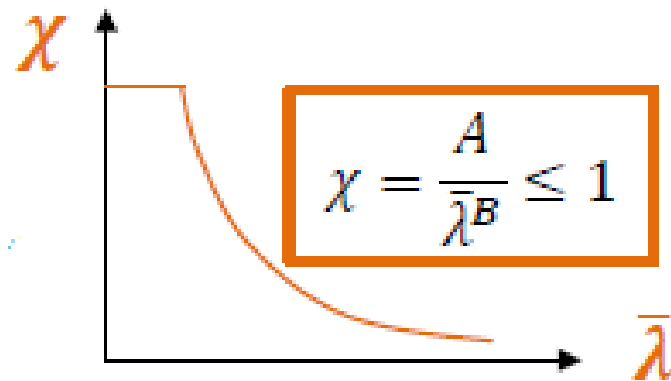


Figura 6.1 Esbeltez-ji

Como se puede observar, sabemos cómo tiene que ser la fórmula para calcular el factor de reducción pero desconocemos los parámetros A y B para los escenarios ETF e ITF. Sin embargo, se pueden estimar analíticamente los valores de χ porque se calculan como:

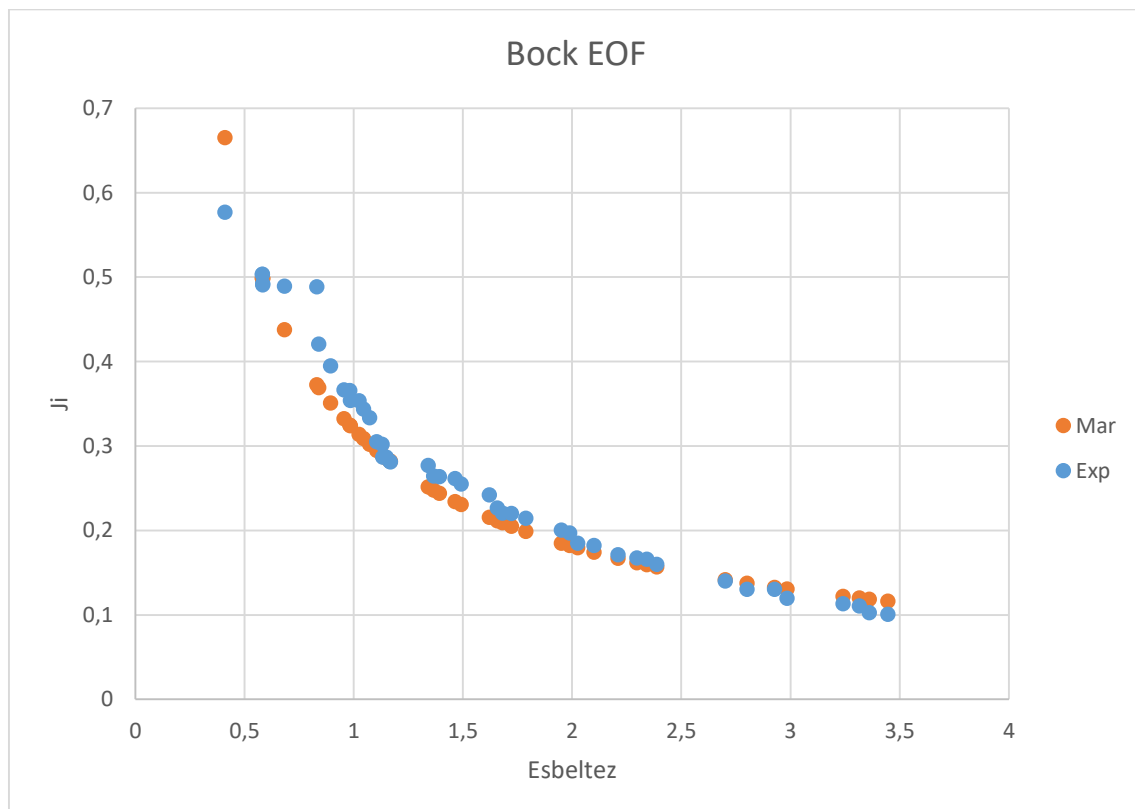
$$\chi = R_{u,exp} / R_{w,pl} \quad (\text{eq. 6.1.2})$$

Conocemos ambos parámetros de esta ecuación (datos experimentales de los test de Li and Young (2018)) y resistencia plástica obtenida con la fórmula propuesta por Bock) por lo que es posible plotear esta gráfica y saber la forma que las formulaciones deberían producir también.

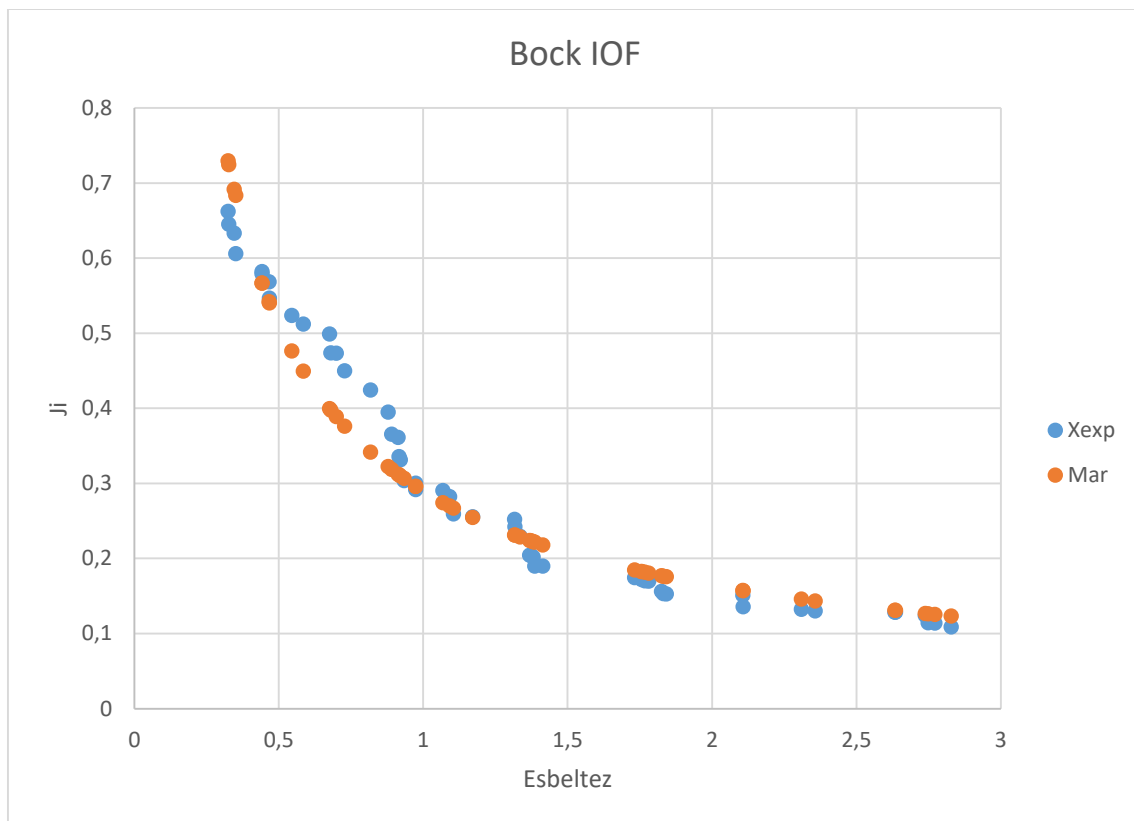
Una vez obtenida esta gráfica el último paso consiste en ir estimando valores de A y B (obteniendo otra gráfica distinta, digamos, analítica) hasta el punto de que tanto la gráfica analítica como la experimental coincidan prácticamente.

Finalmente, con un valor de χ estimado como bueno solamente queda multiplicar este parámetro por la resistencia plástica mencionada anteriormente para así obtener la resistencia ultima a web crippling.

Antes de mostrar los resultados obtenidos para la nueva propuesta se detallará como la propuesta de Bock consigue este objetivo. Para comparar previamente la fórmula de Bock solamente se mencionó la χ utilizada para ello, que en ese caso fue la analítica. Ahora simplemente es necesario calcular la χ experimental con la formula mencionada en esta misma sección y compararlas en las siguientes gráficas 6.1 y 6.2:



Gráfica 6.1 Esbeltez- η [EOF]



Gráfica 6.2 Esbellez-ji [IOF]

Como se intuía, la propuesta de Bock ya era buena de per se debida a la comparación de los ratios con el resto de normativas. Pero este análisis más detallado sobre la reducción de la resistencia plástica y cómo afecta directamente a poder encontrar la mejor propuesta posible para los distintos escenarios hace que esta propuesta sea aún más llamativa y recomendable.

Ya que no da la sensación de que las normativas convencionales se hayan basado en hacer este tipo de análisis ya que sus propuestas distan mucho de los resultados óptimos deseados. Esta nueva propuesta da ratios y desviaciones estándar difícilmente mejorables lo cual dista mucho de las normativas convencionales ya que solamente realizando recalibraciones en sus parámetros ya se obtiene resultados mucho mejores que aun así no llegan a ser tan buenos como los obtenidos por esta nueva metodología.

Es relevante mencionar y explicar brevemente la segunda y tercera propuesta que realizaron Li and Young. La segunda basándose precisamente las hipótesis de la primera propuesta (modificación de la NAS) para hallar una nueva propuesta mejorada volviendo a recalibrar los parámetros de la normativa ya que consideraban que la dispersión era demasiado grande para EOF, IOF y ETF. La tercera propuesta se basó en el "Direct Strength Method".

Sin embargo, se consideró que no era relevante analizar estas propuestas en el apartado 4 de este trabajo por una razón. Cuando se valoró su primera propuesta (sobre todo en ETF e ITF) ya era bastante mejor que el resto. Por lo tanto, parecía redundante analizar estas dos que consiguen mejores resultados aún porque al final la recomendación final iba a ser usar cualquiera de sus tres propuestas para conseguir buenas estimaciones.

Evidentemente si usamos la segunda propuesta íbamos a conseguir una estimación más próxima a la ideal primeramente mostraré los coeficientes y las formulas obtenidas para estas nuevas propuestas y los ratios promedio que obtuvo:

Proposed coefficients for design rules based on modified NAS.

Support and flange conditions		Load cases	C	C_T	C_N	C_h	LRFD ϕ
Unfastened	Stiffened or partially stiffened flanges	EOF	2	0.40	2.15	0.053	0.85
		IOF	2	0.28	1.62	0.003	0.85
		ETF	0.9	0.31	3.00	0.055	0.85
		ITF	7	0.11	0.24	0.001	0.85

Note: The above coefficients apply when $10 \leq h/t \leq 120$, $r/t \leq 2$, $N/t \leq 100$, $\theta = 90^\circ$, and $N/h \leq 1.1$ (for EOF) or $N/h \leq 2.1$ (for IOF, ETF, ITF).

Estos son los nuevos coeficientes recomendados a la hora de utilizar la NAS. Como dije anteriormente Li and Young consideró que los resultados obtenidos para ITF ya eran buenos así que los coeficientes de ese escenario son los mismos que en la primera propuesta. Pero para los otros 3 escenarios cambia dichos coeficientes y consigue mejorarlo. Concretamente las desviaciones estándar de EOF, IOF y ETF respectivamente eran 0,137; 0,143 y 0,2 en comparación al que obtuvo para ITF de 0,1. Con los nuevos coeficientes se consiguen unas desviaciones estándar para EOF, IOF y ETF de 0,07; 0,096 y 0,092.

En su nueva propuesta consigue resultados menos dispersos y más fiables. Igualmente, con los factores de seguridad requeridos por la NAS es recomendable que estas desviaciones estándar sean menores a 0,2 (lo cual ya conseguía la primera propuesta).

Para su tercera propuesta utiliza las siguientes formulas:

$$P_{DSM} = \begin{cases} \gamma \cdot R_y & \lambda \leq \lambda_k \\ a \left[1 - b \left(\frac{R_y}{R_y} \right)^n \right] \left(\frac{R_y}{R_y} \right)^n R_y & \lambda > \lambda_k \end{cases} \quad N_m = \begin{cases} N + 2.5R + 0.5h & \text{for EOF and ETF} \\ N + 5R + h & \text{for IOF and ITF} \end{cases}$$

$$R_y = \alpha_p t N_m \sigma_{0.2} \quad \alpha_p = \frac{0.5}{k_s} \left[1 + (1 - \alpha_{pm}^2) \left(1 + \frac{k_s}{k_v} (1 - \alpha_{pm}^2) \frac{0.25}{k_v^2} \right) \right]$$

$$P_{cr} = \alpha_c t N_m \sigma_{0.2} \quad \alpha_p = \sqrt{2 + k_s^2} - k_s$$

$$k_s = 2R/t - 1 \quad \alpha_{pm} = 1/k_s + 0.5/k_v \quad k_v = h/t$$

Para poder utilizar estas fórmulas hace falta conocer determinados parámetros especificados en la siguiente tabla:

Table 13

Proposed coefficients for design rules based on DSM.

Support and flange conditions		Load cases	a	b	n	λ_k	γ	LRFD ϕ
Unfastened	Stiffened or partially stiffened flange	EOF	0.96	0.23	0.51	0.584	1.00	0.85
		IOF	0.93	0.30	0.41	0.600	0.77	0.85
		ETF	0.66	0.17	0.55	0.447	0.94	0.85
		ITF	0.73	0.01	0.35	0.480	1.20	0.85

Note: The above coefficients apply when $10 \leq h/t \leq 120$, $\tau/t \leq 2$, $N/t \leq 100$, $\theta = 90^\circ$, and $N/h \leq 1.1$ (for EOF) or $N/h \leq 2.1$ (for IOF, ETF, ITF).

Con toda esta información se obtiene unas nuevas desviaciones estándar para EOF, IOF, ETF e ITF respectivamente de 0,064; 0,07; 0,062 y 0,071. La desviación estándar previa en el escenario de ITF era de 0,091.

Esta nueva propuesta mejora aún más los resultados obtenidos por la primera y la segunda, no sólo en la media (que ya daba resultados buenos) sino en lo más importante, la dispersión de los datos y la fiabilidad de los mismos. Esta fiabilidad se puede reflejar de forma más clara con las gráficas esbeltez- χ mencionadas anteriormente y que Li and Ben Young muestran en su artículo (figuras 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5)

External One Flange

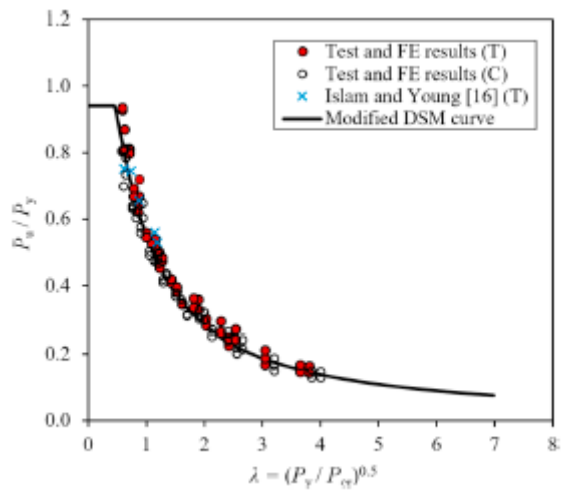


Figura 6.2. Esbeltez- Ji [Li and Young(2018)] EOF

Internal One Flange

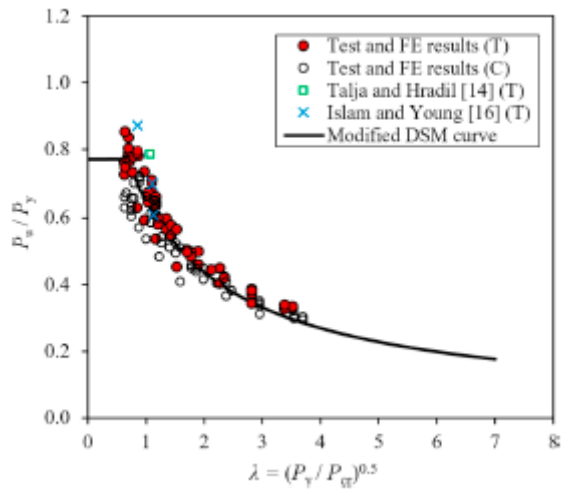


Figura 6.3. Esbeltez- Ji [Li and Young(2018)] IOF

External Two Flanges

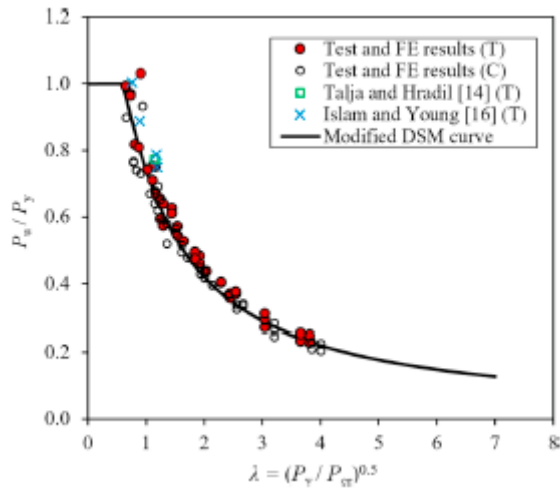


Figura 6.4 Esbeltez- Ji [Li and Young(2018)] ETF

Internal Two Flanges

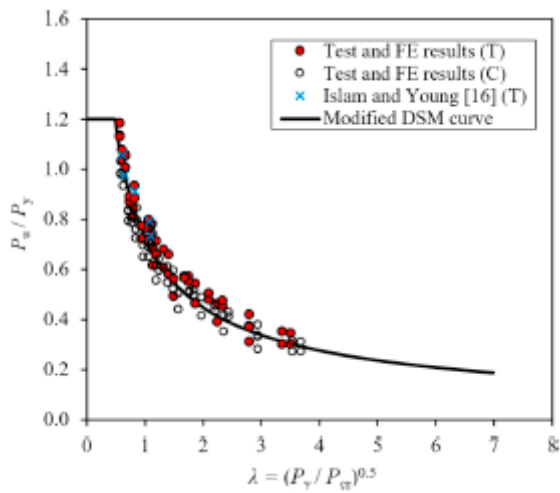


Figura 6.5 Esbeltez- Ji [Li and Young(2018)] ITF

Los datos experimentales coinciden con la curva negra analítica de diseño para los distintos casos lo cual es una comprobación más relevante que la comprobación de los ratios promedios estudiados en secciones anteriores.

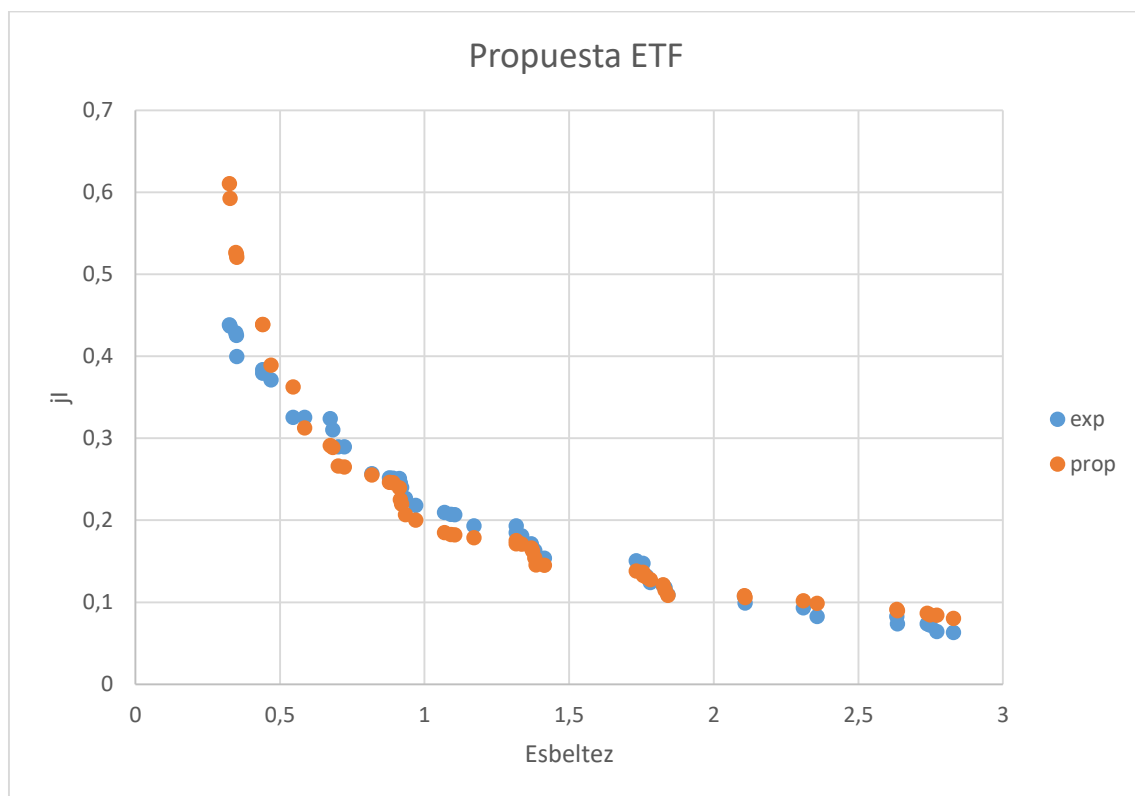
7. Nueva propuesta

7.1 Nueva propuesta basada en Direct Strength Method

De esta forma y una vez mostrados el modus operandi descritos por Bock y Li and Young con ligeras diferencias en la nomenclatura de las ecuaciones entre ambos, se muestran los resultados obtenidos por la nueva propuesta para los casos de ETF y ITF utilizando la nomenclatura descrita por Bock (referente a l_y y k_{ϕ}).

Estas son las aproximaciones obtenidas en las gráficas (gráfica 7.1 y 7.2)

ETF:



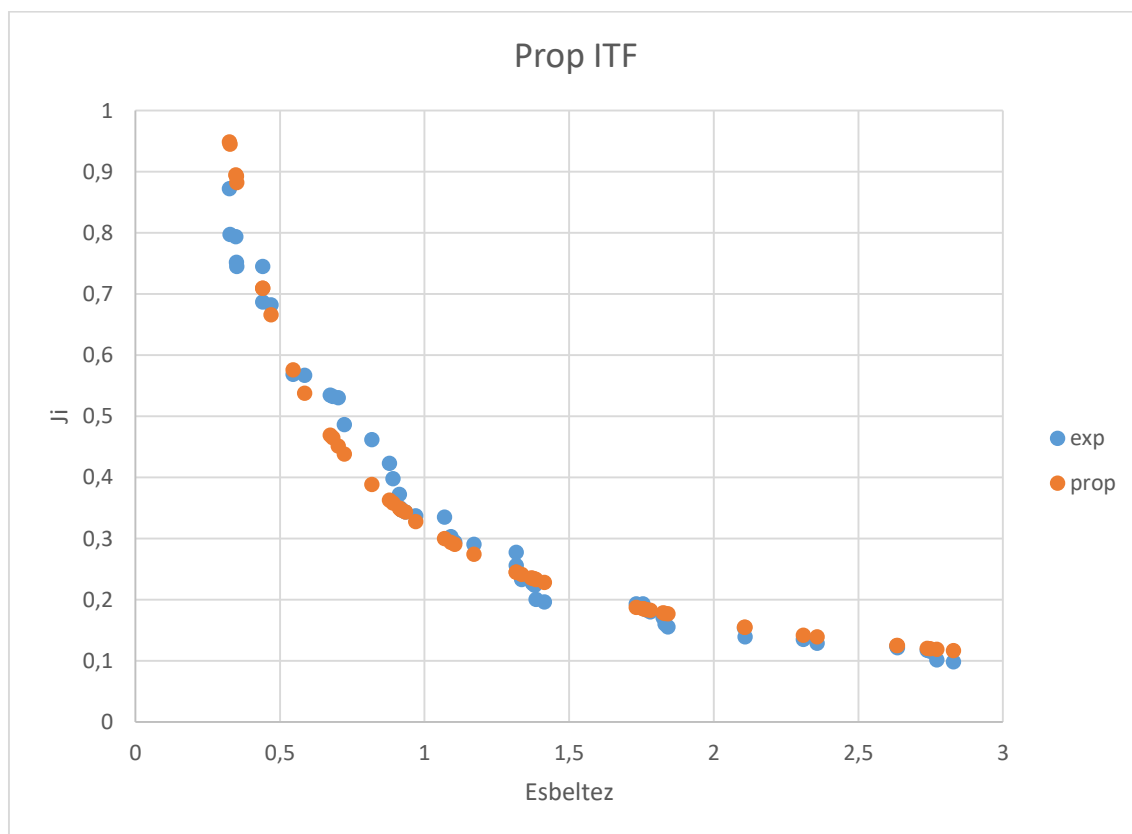
Gráfica 7.1 Esbeltez- η (propuesta, ETF)

Esta es la curva obtenida minimizando el ratio $\frac{\text{Resultado experimental}}{\text{Resultado nueva propuesta}}$ lo más próximo a 1 y minimizando la desviación estándar todo lo posible. Ha sido posible para unos valores de A y B de 0,31 y 1,03 respectivamente.

Con esta propuesta, aparte de que ambas curvas son extremadamente similares el ratio obtenido fue de un 1,00281 y la desviación estándar de 0,228. Aunque la desviación ha dado ligeramente alta cabe recalcar que principalmente es debido a los primeros valores de la gráfica correspondientes a esbelteces menores a 0,5 y jis superiores a 0,4. Para el resto de valores la aproximación es bastante buena en comparación a las normativas convencionales y muy similares a las realizadas por Bock y Li and Young. Ya que de no tener en cuenta esos valores obtendríamos un nuevo ratio promedio de 1,012 y una desviación estándar correspondiente a un 0,097.

Por ese mismo motivo es considerable que en un futuro sería recomendable realizar un estudio detallado para proponer unos nuevos coeficientes para aquellos casos en los que la esbeltez sea menor a 0,5. Desafortunadamente no dispongo del número de datos experimentales suficientes para poder proponer una nueva fórmula en condiciones. Ya que solamente dispongo de 4 datos experimentales que cumplan dicho requisito y por lo tanto no sería una buena aproximación.

ITF:



Gráfica 7.2 Esbeltez-ji (propuesta, ITF)

Para esta nueva propuesta ha sido necesario estimar unos valores de A y B de 0,32 y 0,97 respectivamente.

Con estos valores el ratio promedio obtenido fue de 1,0001 y la desviación estándar de 0,142. Esta nueva aproximación está algo mejor encaminada que la anterior para ETF pero sigue teniendo el mismo problema en la dispersión de los valores obtenidos pero esta vez para esbelteces comprendidas entre 0,5 y 1. Aun así sigue siendo una propuesta mucho más viable que las normativas convencionales y da resultados más o menos similares a las propuestas de Bock y Li and Young.

Igualmente, si se quisiera valorar solamente aquellos datos experimentales con esbelteces más adecuadas se obtiene un ratio promedio correspondiente a 0,96 y una desviación estándar de 0,077.

Es reseñable justificar la elección de las fórmulas de Bock para la nueva propuesta. Ya que como se explicó en apartados anteriores la propuesta de Bock usaba fórmulas que solamente se referían a EOF e IOF (las fórmulas de l_y y k_f) pero yo las utilicé para ETF e ITF. Concretamente, se utilizó las fórmulas de EOF para ETF y la de IOF para ITF. Las formulas propuestas por Bock fueron halladas después de realizar un análisis estadístico completo por lo que 'teóricamente' no deberían ser las mismas.

Sin embargo, cabe recordar que algo que se repite tanto en las normativas como en las nuevas propuestas es que si se fija debidamente a pesar de que son 4 escenarios distintos se utilizan las mismas formulaciones para los casos de carga externa como los casos de carga interna. Por ejemplo, en la propuesta de Li and Young de 'Direct Method' el parámetro distintivo N_M tiene dos formulaciones distintas, una para EOF y ETF y otra para IOF e ITF. El propio Eurocodigo hace referencia a dos categorías (y no a los 4 escenarios) y cada categoría hace referencia a la carga interna y externa respectivamente.

Lo único que cambian en las normativas entre los casos de 'una ala' y 'dos alas' son determinados coeficientes que varían en función de un análisis estadístico como el que se ha realizado para calibrarlos correctamente. Para la NAS estos coeficientes eran C , C_R , C_N y C_h y para el 'Direct Strength Method' son los coeficientes A y B respectivamente.

En conclusión, esta nueva recomendación se basa en utilizar las propuestas de Li and Young o las realizadas en este trabajo para poder estimar correctamente la resistencia a web crippling de estructuras de acero inoxidable para todas aquellas que se encuentren en los escenarios de External Two Flanges e Internal Two Flanges. En la siguiente tabla se presentan los resultados finales.

Escenarios	A	B	Media	Desviación estándar
ETF	0,31	1,03	1,012	0,097
ITF	0,32	0,97	0,96	0,077

Ecuación 7.1. Nuevas propuestas complementarias al estudio de Bock para los escenarios a dos alas

$$\chi = \frac{0,32}{\lambda^{0,97}} \quad \chi = \frac{0,31}{\lambda^{1,03}}$$

7.2. Nueva propuesta basada en la modificación de la ASCE

Como se describió en la sección 4, el problema que daba la normativa ASCE es que las desviaciones estándar eran ligeramente altas (0,2; 0,2; 0,23 y 0,27) y los ratios promedio no se acercaban lo óptimo a 1 en algunos de sus escenarios (1,33; 1,06; 1,35 y 1,06) si se comparaban con el factor de seguridad estipulado por las normativas como 1,1. Por lo cual, es recomendable recalibrar esta normativa sobre todo para los casos de carga externa en los que da ese ratio promedio aproximadamente a 1,3.

Para realizar esta nueva propuesta para cada uno de los escenarios se tomó la metodología escogida por Li and Young consistente en recalibrar los valores numéricos que se asignan a parámetros concretos de la formulación a base de “prueba y error” hasta hallar la solución óptima.

Dichos parámetros eran C_t (6,9 si usamos el resto de parámetros en unidades del sistema internacional), C_1 , C_2 , C_3 y C_4 . Estos 4 últimos parámetros dependían de las variables k , R y t . Como k viene definida por el módulo elástico de la pieza al final todos estos dependen de la muestra que estamos utilizando.

El primer parámetro que es interesante calibrar es C_t , ya que es una constante definida por la normativa para estructuras de acero al carbono. Por lo que es probable que al calibrar este parámetro mejoren los resultados. Cuando se obtengan unos resultados óptimos calibrando este parámetro el siguiente paso sería calibrar las constantes que multiplican los parámetros k , R y t para definir las otras constantes C . Ya que estos valores numéricos usados en las formulaciones están definidos para estructuras de acero al carbono al igual que C_t . También es posible retocar el “33” utilizado para estimar el parámetro k en la formula (3.3.4-21). Y para explicarlo un poco me gustaría poner como ejemplo el modus operandi realizado para uno de los escenarios, EOF.

Primeramente se calculó que al aumentar el parámetro C_t de 6,9 a 7,9 el ratio promedio disminuía de un 1,24 a un 1,12 y la desviación estándar disminuía de un 0,19 a un 0,17. Eso ya es una aproximación bastante aceptable pero al aumentar este 7,9 a un 8,5 el ratio promedio obtenido era de 1,07 y la desviación estándar de 0,16. Y para acabar de afinar un poco más, se retocó la formula (3.3.4-12, referente al parámetro C_3) aumentando el valor de 1,33 a 1,39. De esta forma, finalmente una nueva propuesta con estos nuevos parámetros para EOF obtendría un ratio promedio de 1,0032 y una desviación estándar de 0,15.

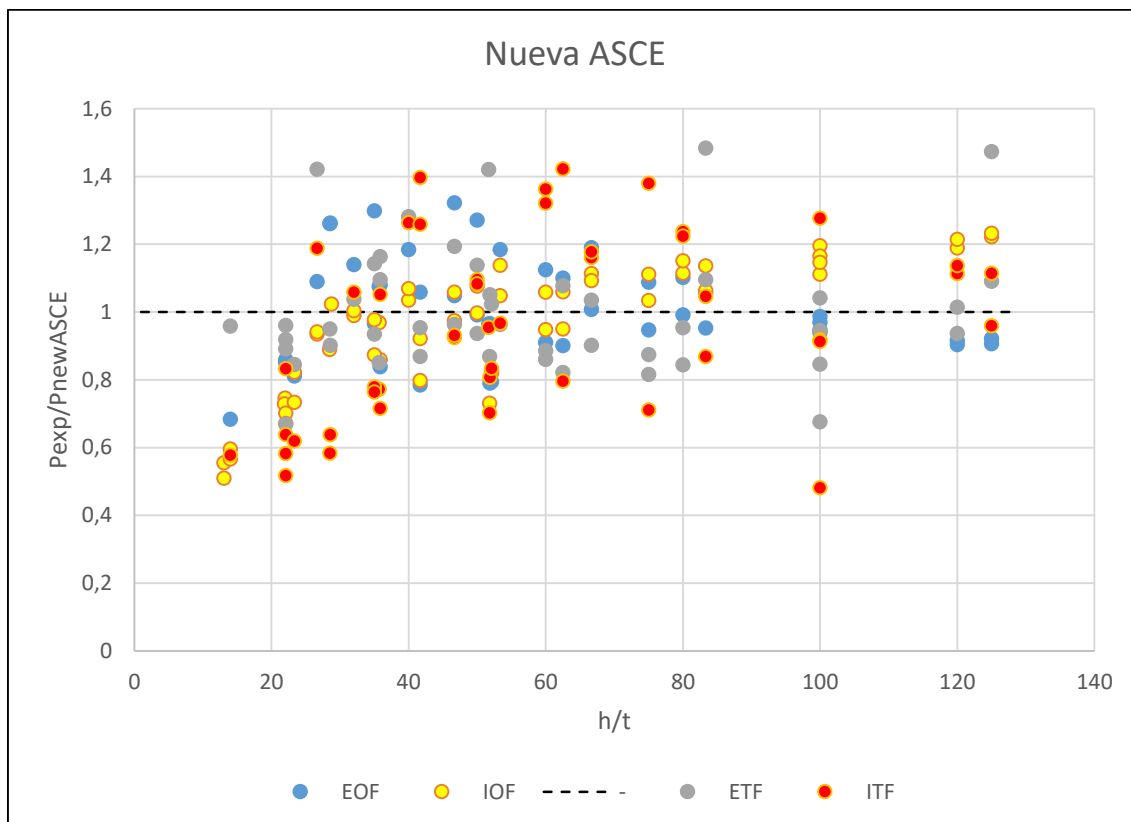
A continuación, se aplicó la misma metodología para el resto de escenarios y obtengo los siguientes resultados:

IOF: El ratio promedio inicial era 1,064 y la desviación estándar era 0,206. Con una nueva aproximación utilizando un C_t equivalente a 8 y sustituyendo el 33 de la formula (3.3.4-21) de lo normativa ASCE por un 31 se obtiene un nuevo ratio promedio de 0,96 y una desviación estándar de 0,18.

ETF: El ratio promedio inicial era 1,37 y la desviación estándar era 0,24. Con una nueva aproximación sustituyendo el “6,9” correspondiente a C_t por un 10 y el 1,33 de la fórmula (3.3.4-12) por un 1,41 el ratio promedio se reduce a un 1,0017 y la desviación estándar a un 0,17.

ITF: El ratio promedio inicial era 1,06 y la desviación estándar era 0,28. Con una nueva aproximación cambiando el 6,9 (mencionado reiteradas veces) por un 8,1 se obtiene un nuevo ratio promedio equivalente a 0,97 y una nueva desviación estándar de 0,25.

Escenarios	C	3.3.4-12	3.3.4-21	Media	Desviación estándar
EOF	8,5	1,39	-	1,0032	0,15
IOF	8	-	31	0,96	0,18
ETF	10	1,41	-	1,0017	0,17
ITF	8,1	-	-	0,97	0,25



Gráfica 7.3. Resultados comparativas de la "nueva ASCE"

Los objetivos iniciales al modificar la normativa ASCE eran reducir los ratios promedio para los casos de carga externa y la desviación estándar para los casos de carga interna y eso se muestra en la gráfica 7.3.

Como conclusión, los resultados obtenidos al realizar estas modificaciones han sido mucho más efectivos para los casos de carga externa que los casos de carga interna.

En los casos de carga interna hemos pasado de ratios promedios ligeramente elevados (superiores a 1,2) a unos que son prácticamente 1. Además de que

también la desviación estándar se ha reducido considerablemente, por ejemplo, en el escenario de 0,24 a 0,17.

Sin embargo, en los casos de carga externa la ratio promedio ya era bastante bueno (inferior a 1,1) y al modificar los parámetros la desviación sólo ha sido posible reducirla un intervalo de 0,2 aun calibrando los parámetros en los mismos ordenes de magnitud que los escenarios de carga interna. La única manera de conseguir una desviación estándar mucho más reducida hubiese sido a costa de sacrificar la ratio promedio a uno excesivamente bajo por lo que no merecía la pena.

La interpretación obtenida de estos resultados es que las formulaciones actuales propuestas por la normativa ASCE no son eficaces para obtener resultados igual de buenos para los casos de carga externa en comparación a los de carga interna. Así que mi recomendación en este aspecto sería buscar una nueva formulación para la normativa ASCE como realizó Bock con la normativa del Eurocódigo donde no solamente recalibró algunos parámetros, sino que además añadió unos nuevos.

En conclusión, recomendaría que en caso de querer utilizar la normativa ASCE para estimar la resistencia a web crippling en estructuras de acero inoxidable utilizar estas nuevas propuestas para los casos de carga interna. Se puede utilizar esta nueva propuesta igualmente para los casos de carga externa. Pero para el caso EOF las propuestas realizadas por Bock y Li and Young son mucho más adecuadas. Y en el caso ETF tenemos tanto las propuestas de Bock, Li and Young y la que propuse en la primera parte de mis propuestas referente al “Direct Strength Method” que dan resultados más óptimos.

8. Recomendaciones finales

Teniendo en cuenta toda la información recapitulada y las comparaciones realizadas, en este trabajo se presentan unas recomendaciones finales a seguir para calcular con exactitud la resistencia a web crippling:

1. Escenario External One Flange:

Marina Bock/ Li and Young/ ASCE modificada

2. Escenario Internal One Flange:

Marina Bock/ Li and Young

3. Escenario External Two Flanges

Li and Young/ propuesta 'direct method' (de este trabajo)/ ASCE modificada

4. Escenario Internal Two Flanges

Li and Young/ propuesta direct method/ ASCE modificada

8. Conclusiones

El análisis de las propuestas convencionales para determinar la resistencia última a web crippling en secciones de acero inoxidable determina que la NAS y la ASCE proporciona resultados que cumple los requisitos de ratios promedios y desviaciones estándar más o menos en los límites establecidos.

Sin embargo, la otra normativa convencional, Eurocodigo, da resultados bastante alejados de los límites requeridos en cualquiera de sus escenarios.

Ahora bien, las propuestas realizadas por Li and Young para mejorar la NAS, por Bock con el EC3 y la presentada este trabajo para la ASCE, dan resultados un tanto variopintos.

Bock consiguió que la normativa EC3 mejorara sus predicciones al ajustar mejor los coeficientes de las fórmulas. Así que con este nuevo estudio esta normativa convencional pasa a ser viable para poder restimar la resistencia última.

Li and Young consiguen por norma general (menos en el escenario ETF) resultados bastante interesantes a diferencia de lo que conseguía la NAS con sus coeficientes originales.

Las propuestas realizadas en este trabajo para mejorar la normativa ASCE tiene ciertas ventajas y desventajas.

En el caso de carga externa consigue mejorar significativamente los resultados.

En el caso de carga interna consigue resultados más o menos similares a pesar de realizar múltiples recalibraciones de sus parámetros. Haría falta realizar otro estudio para analizar en detenimiento el comportamiento de esta normativa y la influencia de sus parámetros a la hora de modificar el resultado final.

Ya que además, a diferencia del resto de normativas (incluso de las propuestas) es la única que presenta 4 fórmulas distintas para cada uno de los escenarios (el resto solo presenta una única fórmula), lo cual puede ser de significativa relevancia a la hora de obtener resultados dispares entre distintos escenarios y sería mucho más fácil realizar una propuesta viable si solamente tuviésemos que recalibrar los coeficientes de una única fórmula.

Por lo cual, se considera que para aquellos escenarios de carga interna no proporciona malos resultados pero en el caso de disponer solamente las formulas definidas por las normativas convencionales sigue siendo una opción igual de válida que las mismas (quizá un poco más afinada incluso).

9. Anejos de resultados

9.1 Resultados experimentales de Li and Young (2018)

9.1.1 External One Flange

Tabla 9.1 EOF [Li and Young 2018)]

section	H	B	t	r	R	N	$E(TC)$	$f_y(TC)$
EOF-80x80x3N50	80	80	2,80	3,0	5,8	50	19500 0	417
EOF-60x40x3N30	60	40	2,72	3,1	5,8	30	20440 0	401
EOF-60x40x3N30-R	60	40	2,72	3,1	5,8	30	20440 0	401
EOF-100x40x2N50	100	40	1,93	3,8	5,7	50	20050 0	426
EOF-100x40x2N30	100	40	1,92	3,8	5,7	30	20050 0	426
EOF-100x50x3N50-R	100	50	2,80	2,6	5,4	50	19810 0	428
EOF-80x80x3N50	80	80	2,8	3	5,8	50	19500 0	417
EOF-60x40x3N30	60	40	2,72	3,1	5,8	30	20440 0	401
EOF-60x40x3N30-R	60	40	2,72	3,1	5,8	30	20440 0	401
EOF-100x40x2N50	100	40	1,93	3,8	5,7	50	20050 0	426
EOF-100x40x2N30	100	40	1,92	3,8	5,7	30	20050 0	426
EOF-100x50x3N50-R	100	50	2,8	2,6	5,4	50	19810 0	428
EOF-100x50x3N30	100	50	2,79	2,6	5,4	30	19810 0	428
EOF-70x70x1.5N70	70	70	1,5	1,5	3	70	19500 0	417
EOF-70x70x1.5N35	70	70	1,5	1,5	3	35	19500 0	417
EOF-70x70x2N70	70	70	2	2	4	70	19500 0	417
EOF-70x70x2N35	70	70	2	2	4	35	19500 0	417
EOF-70x70x3N35	70	70	3	3	6	35	19500 0	417
EOF-70x70x5N35	70	70	5	5	10	35	19500 0	417
EOF-200x200x2N200	200	200	2	2	4	200	19500 0	417
EOF-200x200x2N100	200	200	2	2	4	100	19500 0	417

EOF- 200x200x2.5N200	200	200	2,5	2,5	5	200	19500 0	417
EOF- 200x200x2.5N100	200	200	2,5	2,5	5	100	19500 0	417
EOF- 200x200x3N200	200	200	3	3	6	200	19500 0	417
EOF- 200x200x3N100	200	200	3	3	6	100	19500 0	417
EOF- 200x200x4N200	200	200	4	4	8	200	19500 0	417
EOF- 200x200x4N100	200	200	4	4	8	100	19500 0	417
EOF- 80x140x1.5N70	80	140	1,5	1,5	3	70	19500 0	417
EOF- 80x140x2N70	80	140	2	2	4	70	19500 0	417
EOF- 80x140x2.5N70	80	140	2,5	2,5	5	70	19500 0	417
EOF- 80x140x3N70	80	140	3	3	6	70	19500 0	417
EOF- 250x150x2N150	250	150	2	2	4	150	19500 0	417
EOF- 250x150x2N75	250	150	2	2	4	75	19500 0	417
EOF- 250x150x3N150	250	150	3	3	6	150	19500 0	417
EOF- 250x150x3N75	250	150	3	3	6	75	19500 0	417
EOF- 250x150x4N150	250	150	4	4	8	150	19500 0	417
EOF- 250x150x4N75	250	150	4	4	8	75	19500 0	417
EOF- 250x150x6N150	250	150	6	6	12	150	19500 0	417
EOF- 250x150x6N75	250	150	6	6	12	75	19500 0	417
EOF- 300x200x2.5N200	300	200	2,5	2,5	5	200	19500 0	417
EOF- 300x200x2.5N100	300	200	2,5	2,5	5	100	19500 0	417
EOF- 300x200x3N200	300	200	3	3	6	200	19500 0	417
EOF- 300x200x3N100	300	200	3	3	6	100	19500 0	417
EOF- 300x200x4N200	300	200	4	4	8	200	19500 0	417
EOF- 300x200x4N100	300	200	4	4	8	100	19500 0	417
EOF- 300x200x5N200	300	200	5	5	10	200	19500 0	417
EOF- 300x200x5N100	300	200	5	5	10	100	19500 0	417

9.1.2 Internal One Flange

Tabla 9.2 IOF [Li and Young 2018)]

section	H	B	t	r	R	N	$E(TC)$	$f_y(TC)$
IOF-50x50x4N50	50	50	3,83	4,0	7,8	50	19640 0	459
IOF-50x50x4N30	50	50	3,83	4,0	7,8	30	19640 0	459
IOF-80x80x3N90	80	80	2,78	3,0	5,8	90	19500 0	417
IOF-80x80x3N50	80	80	2,81	3,0	5,8	50	19500 0	417
IOF-60x40x3N50	60	40	2,73	3,1	5,8	50	20440 0	401
IOF-60x40x3N50-R	60	40	2,74	3,1	5,8	50	20440 0	401
IOF-60x40x3N30	60	40	2,72	3,1	5,8	30	20440 0	401
IOF-60x40x3N30-R	60	40	2,72	3,1	5,8	30	20440 0	401
IOF-100x40x2N50	100	40	1,92	3,8	5,7	50	20050 0	426
IOF-100x40x2N50-R	100	40	1,92	3,8	5,7	50	20050 0	426
IOF-100x40x2N30	100	40	1,93	3,8	5,7	30	20050 0	426
IOF-100x50x3N50	100	50	2,80	2,6	5,4	50	19810 0	428
IOF-100x50x3N30	100	50	2,79	2,6	5,4	30	19810 0	428
IOF-70x70x1.5N70	70	70	1,50	1,5	3,0	70	19500 0	417
IOF-70x70x1.5N35	70	70	1,50	1,5	3,0	35	19500 0	417
IOF-70x70x2N70	70	70	2,00	2,0	4,0	70	19500 0	417
IOF-70x70x2N35	70	70	2,00	2,0	4,0	35	19500 0	417
IOF-70x70x3N70	70	70	3,00	3,0	6,0	70	19500 0	417
IOF-70x70x3N35	70	70	3,00	3,0	6,0	35	19500 0	417
IOF-70x70x5N70	70	70	5,00	5,0	10,0	70	19500 0	417
IOF-70x70x5N35	70	70	5,00	5,0	10,0	35	19500 0	417
IOF-200x200x2N200	200	200	2,00	2,0	4,0	200	19500 0	417
IOF-200x200x2N100	200	200	2,00	2,0	4,0	100	19500 0	417
IOF-200x200x2.5N200	200	200	2,50	2,5	5,0	200	19500 0	417
IOF-200x200x2.5N100	200	200	2,50	2,5	5,0	100	19500 0	417

IOF-200x200x3N200	200	200	3,00	3,0	6,0	200	19500	417
IOF-200x200x3N100	200	200	3,00	3,0	6,0	100	19500	417
IOF-200x200x4N200	200	200	4,00	4,0	8,0	200	19500	417
IOF-200x200x4N100	200	200	4,00	4,0	8,0	100	19500	417
IOF-80x140x1.5N140	80	140	1,50	1,5	3,0	140	19500	417
IOF-80x140x1.5N70	80	140	1,50	1,5	3,0	70	19500	417
IOF-80x140x2N140	80	140	2,00	2,0	4,0	140	19500	417
IOF-80x140x2N70	80	140	2,00	2,0	4,0	70	19500	417
IOF-80x140x2.5N140	80	140	2,50	2,5	5,0	140	19500	417
IOF-80x140x2.5N70	80	140	2,50	2,5	5,0	70	19500	417
IOF-80x140x3N140	80	140	3,00	3,0	6,0	140	19500	417
IOF-80x140x3N70	80	140	3,00	3,0	6,0	70	19500	417
IOF-250x150x2N150	250	150	2,00	2,0	4,0	150	19500	417
IOF-250x150x2N75	250	150	2,00	2,0	4,0	75	19500	417
IOF-250x150x3N150	250	150	3,00	3,0	6,0	150	19500	417
IOF-250x150x3N75	250	150	3,00	3,0	6,0	75	19500	417
IOF-250x150x4N150	250	150	4,00	4,0	8,0	150	19500	417
IOF-250x150x4N75	250	150	4,00	4,0	8,0	75	19500	417
IOF-250x150x6N150	250	150	6,00	6,0	12,0	150	19500	417
IOF-250x150x6N75	250	150	6,00	6,0	12,0	75	19500	417
IOF-300x200x2.5N200	300	200	2,50	2,5	5,0	200	19500	417
IOF-300x200x2.5N100	300	200	2,50	2,5	5,0	100	19500	417
IOF-300x200x3N200	300	200	3,00	3,0	6,0	200	19500	417
IOF-300x200x3N100	300	200	3,00	3,0	6,0	100	19500	417
IOF-300x200x4N200	300	200	4,00	4,0	8,0	200	19500	417
IOF-300x200x4N100	300	200	4,00	4,0	8,0	100	19500	417
IOF-300x200x5N200	300	200	5,00	5,0	10,0	200	19500	417
IOF-300x200x5N100	300	200	5,00	5,0	10,0	100	19500	417

9.1.3 External Two Flanges

Tabla 9.3 ETF [Li and Young 2018)]

section	H	B	t	r	R	N	$E(TC)$	$f_y(TC)$
ETF-50x50x4N50	50	50	3,82	4	7,8	50	19640 0	459
ETF-50x50x4N50-R	50	50	3,79	4	7,8	50	19640 0	459
ETF-50x50x4N30	50	50	3,82	4	7,8	30	19640 0	459
ETF-80x80x3N90	80	80	2,8	3	5,8	90	19500 0	417
ETF-80x80x3N50	80	80	2,8	3	5,8	50	19500 0	417
ETF-60x40x3N50	60	40	2,72	3,1	5,8	50	20440 0	401
ETF-60x40x3N30	60	40	2,73	3,1	5,8	30	20440 0	401
ETF-60x40x3N30-R	60	40	2,73	3,1	5,8	30	20440 0	401
ETF-100x40x2N50	100	40	1,93	3,8	5,7	50	20050 0	426
ETF-100x40x2N30	100	40	1,93	3,8	5,7	30	20050 0	426
ETF-100x50x3N50	100	50	2,79	2,6	5,4	50	19810 0	428
ETF-100x50x3N30	100	50	2,8	2,6	5,4	30	19810 0	428
ETF-70x70x1.5N70	70	70	1,5	1,5	3	70	19500 0	417
ETF-70x70x1.5N35	70	70	1,5	1,5	3	35	19500 0	417
ETF-70x70x2N70	70	70	2	2	4	70	19500 0	417
ETF-70x70x2N35	70	70	2	2	4	35	19500 0	417
ETF-70x70x3N70	70	70	3	3	6	70	19500 0	417
ETF-70x70x3N35	70	70	3	3	6	35	19500 0	417
ETF-70x70x5N70	70	70	5	5	10	70	19500 0	417
ETF-70x70x5N35	70	70	5	5	10	35	19500 0	417
ETF-200x200x2N200	200	200	2	2	4	200	19500 0	417
ETF-200x200x2N100	200	200	2	2	4	100	19500 0	417
ETF-200x200x2.5N200	200	200	2,5	2,5	5	200	19500 0	417
ETF-200x200x2.5N100	200	200	2,5	2,5	5	100	19500 0	417
ETF-200x200x3N200	200	200	3	3	6	200	19500 0	417

ETF- 200x200x3N100	200	200	3	3	6	100	19500 0	417
ETF- 200x200x4N200	200	200	4	4	8	200	19500 0	417
ETF- 200x200x4N100	200	200	4	4	8	100	19500 0	417
ETF- 80x140x1.5N140	80	140	1,5	1,5	3	140	19500 0	417
ETF- 80x140x1.5N70	80	140	1,5	1,5	3	70	19500 0	417
ETF- 80x140x2N140	80	140	2	2	4	140	19500 0	417
ETF- 80x140x2N70	80	140	2	2	4	70	19500 0	417
ETF- 80x140x2.5N140	80	140	2,5	2,5	5	140	19500 0	417
ETF- 80x140x2.5N70	80	140	2,5	2,5	5	70	19500 0	417
ETF- 80x140x3N140	80	140	3	3	6	140	19500 0	417
ETF- 80x140x3N70	80	140	3	3	6	70	19500 0	417
ETF- 250x150x2N150	250	150	2	2	4	150	19500 0	417
ETF- 250x150x2N75	250	150	2	2	4	75	19500 0	417
ETF- 250x150x3N150	250	150	3	3	6	150	19500 0	417
ETF- 250x150x3N75	250	150	3	3	6	75	19500 0	417
ETF- 250x150x4N150	250	150	4	4	8	150	19500 0	417
ETF- 250x150x4N75	250	150	4	4	8	75	19500 0	417
ETF- 250x150x6N150	250	150	6	6	12	150	19500 0	417
ETF- 250x150x6N75	250	150	6	6	12	75	19500 0	417
ETF- 300x200x2.5N200	300	200	2,5	2,5	5	200	19500 0	417
ETF- 300x200x2.5N100	300	200	2,5	2,5	5	100	19500 0	417
ETF- 300x200x3N200	300	200	3	3	6	200	19500 0	417
ETF- 300x200x3N100	300	200	3	3	6	100	19500 0	417
ETF- 300x200x4N200	300	200	4	4	8	200	19500 0	417
ETF- 300x200x4N100	300	200	4	4	8	100	19500 0	417
ETF- 300x200x5N200	300	200	5	5	10	200	19500 0	417
ETF- 300x200x5N100	300	200	5	5	10	100	19500 0	417

9.1.4. Internal Two Flanges

Tabla 9.4 ITF [Li and Young 2018)]

section	H	B	t	r	R	N	$E(TC)$	$f_y(TC)$
ITF-50x50x4N50	50	50	3,83	4	7,8	50	19640 0	459
ITF-50x50x4N50-R	50	50	3,82	4	7,8	50	19640 0	459
ITF-50x50x4N30	50	50	3,81	4	7,8	30	19640 0	459
ITF-80x80x3N90	80	80	2,8	3	5,8	90	19500 0	417
ITF-80x80x3N50	80	80	2,81	3	5,8	50	19500 0	417
ITF-60x40x3N50	60	40	2,72	3,1	5,8	50	20440 0	401
ITF-60x40x3N30	60	40	2,73	3,1	5,8	30	20440 0	401
ITF-60x40x3N30-R	60	40	2,73	3,1	5,8	30	20440 0	401
ITF-100x40x2N50	100	40	1,92	3,8	5,7	50	20050 0	426
ITF-100x40x2N30	100	40	1,94	3,8	5,7	30	20050 0	426
ITF-100x50x3N50	100	50	2,79	2,6	5,4	50	19810 0	428
ITF-100x50x3N30	100	50	2,8	2,6	5,4	30	19810 0	428
ITF-70x70x1.5N70	70	70	1,5	1,5	3	70	19500 0	417
ITF-70x70x1.5N35	70	70	1,5	1,5	3	35	19500 0	417
ITF-70x70x2N70	70	70	2	2	4	70	19500 0	417
ITF-70x70x2N35	70	70	2	2	4	35	19500 0	417
ITF-70x70x3N70	70	70	3	3	6	70	19500 0	417
ITF-70x70x3N35	70	70	3	3	6	35	19500 0	417
ITF-70x70x5N70	70	70	5	5	10	70	19500 0	417
ITF-70x70x5N35	70	70	5	5	10	35	19500 0	417
ITF-200x200x2N200	200	200	2	2	4	200	19500 0	417
ITF-200x200x2N100	200	200	2	2	4	100	19500 0	417
ITF-200x200x2.5N200	200	200	2,5	2,5	5	200	19500 0	417
ITF-200x200x2.5N100	200	200	2,5	2,5	5	100	19500 0	417
ITF-200x200x3N200	200	200	3	3	6	200	19500 0	417

ITF- 200x200x3N100	200	200	3	3	6	100	19500 0	417
ITF- 200x200x4N200	200	200	4	4	8	200	19500 0	417
ITF- 200x200x4N100	200	200	4	4	8	100	19500 0	417
ITF- 80x140x1.5N140	80	140	1,5	1,5	3	140	19500 0	417
ITF- 80x140x1.5N70	80	140	1,5	1,5	3	70	19500 0	417
ITF- 80x140x2N140	80	140	2	2	4	140	19500 0	417
ITF- 80x140x2N70	80	140	2	2	4	70	19500 0	417
ITF- 80x140x2.5N140	80	140	2,5	2,5	5	140	19500 0	417
ITF- 80x140x2.5N70	80	140	2,5	2,5	5	70	19500 0	417
ITF- 80x140x3N140	80	140	3	3	6	140	19500 0	417
ITF- 80x140x3N70	80	140	3	3	6	70	19500 0	417
ITF- 250x150x2N150	250	150	2	2	4	150	19500 0	417
ITF- 250x150x2N75	250	150	2	2	4	75	19500 0	417
ITF- 250x150x3N150	250	150	3	3	6	150	19500 0	417
ITF- 250x150x3N75	250	150	3	3	6	75	19500 0	417
ITF- 250x150x4N150	250	150	4	4	8	150	19500 0	417
ITF- 250x150x4N75	250	150	4	4	8	75	19500 0	417
ITF- 250x150x6N150	250	150	6	6	12	150	19500 0	417
ITF- 250x150x6N75	250	150	6	6	12	75	19500 0	417
ITF- 300x200x2.5N200	300	200	2,5	2,5	5	200	19500 0	417
ITF- 300x200x2.5N100	300	200	2,5	2,5	5	100	19500 0	417
ITF- 300x200x3N200	300	200	3	3	6	200	19500 0	417
ITF- 300x200x3N100	300	200	3	3	6	100	19500 0	417
ITF- 300x200x4N200	300	200	4	4	8	200	19500 0	417
ITF- 300x200x4N100	300	200	4	4	8	100	19500 0	417
ITF- 300x200x5N200	300	200	5	5	10	200	19500 0	417
ITF- 300x200x5N100	300	200	5	5	10	100	19500 0	417

9.2 Resultados experimentales por las distintas propuestas

9.2.1 External One Flange

Tabla 9.5 Resultados de resistencia última (EOF)

Especimen EOF	Ru,exp	Ru, EC3 (la=10)	Ru, Bock1)	Ru, NAS	Ru, BY	Ru, BY2	Ru, ASCE	Ru, ASCE MOD	Ru, Bock(2)
EOF-80x80x3N50	37,83	9,44	21,35	25,02	26,92	28,58	22,53	30,00	27,74
EOF-60x40x3N30	22,43	8,92	19,54	19,94	20,65	21,43	19,78	26,09	22,70
EOF-60x40x3N30-R	22,28	8,92	19,53	19,93	20,64	21,42	19,77	26,08	22,70
EOF-100x40x2N50	12,05	4,72	10,81	12,27	10,68	10,68	9,22	12,50	12,11
EOF-100x40x2N30	9,00	4,69	10,75	10,44	8,88	8,40	8,40	11,38	9,89
EOF-100x50x3N50-R	32,93	9,67	22,29	25,45	28,37	29,04	22,73	30,47	29,10
EOF-80x80x3N50	37,80	9,42	21,31	24,98	26,87	28,52	22,48	29,94	27,97
EOF-60x40x3N30	22,40	8,94	19,59	19,99	20,71	21,49	19,87	26,20	22,77
EOF-60x40x3N30-R	22,30	8,94	19,59	19,99	20,71	21,49	19,87	26,20	22,77
EOF-100x40x2N50	12,10	4,71	10,80	12,26	10,67	10,66	9,24	12,52	12,10
EOF-100x40x2N30	9,00	4,67	10,71	10,39	8,83	8,35	8,37	11,34	9,84
EOF-100x50x3N50-R	32,90	9,70	22,37	25,54	28,47	29,15	22,81	30,57	29,21
EOF-100x50x3N30	23,90	9,63	22,20	21,95	23,94	23,06	21,25	28,49	23,80
EOF-70x70x1.5N70	13,80	3,06	6,62	9,51	10,81	11,55	7,84	10,44	11,74
EOF-70x70x1.5N35	9,20	3,06	6,62	7,55	8,36	8,38	6,60	8,78	7,95
EOF-70x70x2N70	22,70	5,14	11,38	15,66	17,60	19,36	13,14	17,48	19,82
EOF-70x70x2N35	14,70	5,14	11,38	12,56	13,75	14,10	11,43	15,22	13,42
EOF-70x70x3N35	27,00	10,73	24,55	25,85	27,81	28,82	25,00	33,29	28,08
EOF-70x70x5N35	61,70	27,52	65,25	64,70	68,05	69,65	67,74	90,19	71,14
EOF-200x200x2N200	21,90	5,14	11,38	20,76	24,14	21,65	16,99	22,59	23,94
EOF-200x200x2N100	15,90	5,14	11,38	16,03	18,25	15,59	12,74	16,94	16,21
EOF-200x200x2.5N200	36,60	7,70	17,36	30,58	35,33	34,04	24,96	33,20	35,93
EOF-200x200x2.5N100	25,60	7,70	17,36	23,79	26,87	24,56	19,41	25,82	24,34
EOF-200x200x3N200	54,20	10,73	24,55	41,92	48,16	48,50	34,23	45,54	50,07
EOF-200x200x3N100	36,70	10,73	24,55	32,82	36,83	35,06	27,38	36,43	33,92

EOF-200x200x4N200	95,90	18,21	42,52	68,94	78,47	83,09	56,67	75,41	84,52
EOF-200x200x4N100	62,30	18,21	42,52	54,56	60,55	60,26	47,22	62,84	57,25
EOF-80x140x1.5N70	12,20	3,06	6,62	9,41	10,68	11,09	7,74	10,30	10,02
EOF-80x140x2N70	20,50	5,14	11,38	15,50	17,43	18,73	13,01	17,31	16,91
EOF-80x140x2.5N70	29,70	7,70	17,36	22,86	25,49	27,85	19,57	26,05	25,38
EOF-80x140x3N70	39,80	10,73	24,55	31,43	34,79	38,34	27,44	36,53	35,37
EOF-250x150x2N150	16,90	5,14	11,38	18,04	20,80	16,38	14,03	18,65	19,51
EOF-250x150x2N75	13,50	5,14	11,38	14,07	15,85	11,82	11,03	14,65	14,64
EOF-250x150x3N150	41,80	10,73	24,55	36,87	41,97	38,52	29,74	39,55	40,80
EOF-250x150x3N75	31,40	10,73	24,55	29,18	32,39	27,94	24,78	32,96	30,63
EOF-250x150x4N150	74,10	18,21	42,52	61,11	68,87	67,44	50,64	67,37	68,87
EOF-250x150x4N75	52,40	18,21	42,52	48,90	53,66	49,08	43,73	58,18	51,70
EOF-250x150x6N150	152,20	38,65	92,70	124,58	138,28	142,82	108,04	143,78	144,05
EOF-250x150x6N75	101,50	38,65	92,70	101,36	109,35	104,55	97,23	129,41	108,14
EOF-300x200x2.5N200	27,40	7,70	17,36	29,06	33,57	27,15	22,82	30,33	31,67
EOF-300x200x2.5N100	21,60	7,70	17,36	22,61	25,53	19,59	17,75	23,59	23,31
EOF-300x200x3N200	41,80	10,73	24,55	40,04	46,01	40,17	31,85	42,35	44,13
EOF-300x200x3N100	32,10	10,73	24,55	31,36	35,19	29,04	25,48	33,88	32,48
EOF-300x200x4N200	77,90	18,21	42,52	66,31	75,48	71,79	53,82	71,58	74,50
EOF-300x200x4N100	56,50	18,21	42,52	52,48	58,25	52,06	44,85	59,65	54,82
EOF-300x200x5N200	121,20	27,52	65,25	98,00	110,69	110,19	80,98	107,74	111,82
EOF-300x200x5N100	84,10	27,52	65,25	78,23	86,06	80,13	69,41	92,35	82,29

9.2.2 Internal One Flange

Tabla 9.6 Resultados de resistencia última (IOF)

Especimen IOF	Ru,exp	Ru, EC3 (la=ss)	Ru, Bock 1)	Ru, NAS	Ru, BY	Ru, BY2	Ru, ASC E	Ru, ASCE MOD	Ru, Bock(2)
IOF-50x50x4N50	53,0	49,43	62,75	97,81	71,58	65,29	85,67	95,47	62,99
IOF-50x50x4N30	47,0	43,80	55,43	90,40	63,76	52,72	82,81	92,27	53,17
IOF-80x80x3N90	53,6	31,86	39,89	54,44	43,51	46,01	47,28	52,36	44,81

IOF-80x80x3N50	43,7	27,37	34,23	49,34	37,65	36,12	44,37	49,14	36,66
IOF-60x40x3N50	34,1	26,05	31,80	44,93	34,16	32,85	41,39	45,74	31,83
IOF-60x40x3N50-R	33,6	26,22	32,03	45,26	34,40	33,06	41,70	46,08	32,04
IOF-60x40x3N30	30,4	22,68	27,59	40,83	29,90	26,20	39,20	43,32	27,20
IOF-60x40x3N30-R	29,1	22,68	27,59	40,83	29,90	26,20	39,20	43,32	27,20
IOF-100x40x2N50	18,4	13,98	16,77	22,07	17,90	17,28	20,03	22,21	17,94
IOF-100x40x2N50-R	18,2	13,98	16,77	22,07	17,90	17,28	20,03	22,21	17,94
IOF-100x40x2N30	15,4	12,24	14,62	20,21	15,76	13,94	19,01	21,08	16,18
IOF-100x50x3N50	47,9	28,00	36,04	50,99	39,10	37,80	44,57	49,43	36,38
IOF-100x50x3N30	40,3	24,40	31,30	46,38	34,25	30,17	42,27	46,88	32,26
IOF-70x70x1.5N70	17,1	10,47	13,32	17,17	14,31	15,98	14,59	16,15	12,96
IOF-70x70x1.5N35	13,8	8,45	10,71	14,71	11,63	11,69	12,79	14,17	10,31
IOF-70x70x2N70	26,8	16,97	21,56	28,83	23,28	25,00	24,75	27,41	21,88
IOF-70x70x2N35	21,6	13,86	17,54	25,00	19,15	18,37	22,32	24,72	17,40
IOF-70x70x3N70	48,2	33,79	42,84	60,20	46,61	47,07	52,92	58,60	45,77
IOF-70x70x3N35	40,0	28,08	35,45	53,09	39,01	34,84	49,20	54,49	36,39
IOF-70x70x5N70	92,8	81,64	103,21	153,99	113,37	105,00	140,57	155,68	115,97
IOF-70x70x5N35	84,3	69,35	87,31	138,49	97,00	78,60	134,30	148,74	92,19
IOF-200x200x2N200	37,7	24,30	31,04	36,15	32,88	40,10	30,62	33,91	43,18
IOF-200x200x2N100	32,2	19,04	24,24	29,97	25,93	29,04	24,32	26,93	32,37
IOF-200x200x2.5N200	55,9	35,00	44,68	53,63	47,51	56,61	45,31	50,18	64,82
IOF-200x200x2.5N100	47,4	27,66	35,17	44,90	37,78	41,10	37,18	41,17	48,59
IOF-200x200x3N200	77,2	47,26	60,26	74,14	64,30	75,06	62,61	69,33	90,32
IOF-200x200x3N100	63,7	37,60	47,77	62,56	51,50	54,62	52,65	58,30	67,71
IOF-200x200x4N200	125,2	76,16	96,97	123,89	104,02	117,23	105,03	116,32	152,47

IOF-200x200x4N100	101,0	61,29	77,74	105,84	84,29	85,65	91,42	101,24	114,30
IOF-80x140x1.5N140	20,9	13,32	17,02	20,54	18,09	22,02	18,00	19,93	19,35
IOF-80x140x1.5N70	18,2	10,47	13,32	17,08	14,30	15,96	14,44	16,00	13,56
IOF-80x140x2N140	33,7	21,37	27,25	34,08	29,11	34,33	29,41	32,57	32,66
IOF-80x140x2N70	29,1	16,97	21,56	28,69	23,27	24,96	24,57	27,21	22,89
IOF-80x140x2.5N140	47,6	30,91	39,38	50,59	42,23	48,47	43,43	48,10	49,02
IOF-80x140x2.5N70	41,5	24,76	31,42	43,01	34,06	35,35	37,31	41,32	34,35
IOF-80x140x3N140	62,2	41,87	53,30	70,00	57,34	64,28	60,06	66,52	68,31
IOF-80x140x3N70	54,9	33,79	42,84	59,97	46,60	47,01	52,67	58,33	47,87
IOF-250x150x2N150	35,7	21,89	27,93	32,88	29,66	34,91	26,38	29,21	35,21
IOF-250x150x2N75	29,8	17,34	22,04	27,60	23,65	25,36	21,84	24,18	28,52
IOF-250x150x3N150	70,7	42,84	54,55	68,10	58,39	65,51	56,17	62,21	73,64
IOF-250x150x3N75	57,6	34,47	43,73	58,18	47,31	47,87	48,89	54,14	59,65
IOF-250x150x4N150	113,1	69,36	88,18	114,56	94,91	102,51	96,41	106,77	124,30
IOF-250x150x4N75	90,9	56,48	71,52	99,07	77,84	75,24	86,39	95,67	100,70
IOF-250x150x6N150	212,6	137,90	174,92	239,78	189,77	193,10	208,22	230,60	260,00
IOF-250x150x6N75	170,4	114,24	144,32	210,86	158,35	142,75	192,71	213,42	210,62
IOF-300x200x2.5N200	56,0	35,00	44,68	52,43	47,41	56,25	42,51	47,08	64,70
IOF-300x200x2.5N100	46,9	27,66	35,17	43,89	37,70	40,84	34,88	38,63	50,91
IOF-300x200x3N200	76,7	47,26	60,26	72,62	64,18	74,63	59,45	65,83	90,16
IOF-300x200x3N100	63,5	37,60	47,77	61,28	51,40	54,31	49,99	55,36	70,94
IOF-300x200x4N200	124,5	76,16	96,97	121,70	103,85	116,64	101,15	112,02	152,19

IOF-300x200x4N100	100,8	61,29	77,74	103,97	84,15	85,22	88,04	97,50	119,76
IOF-300x200x5N200	179,7	110,62	140,69	182,03	151,31	165,03	153,30	169,78	228,44
IOF-300x200x5N100	143,4	89,84	156,99	123,75	136,54	120,99	151,21	179,75	179,75

9.2.3 External Two Flanges

Tabla 9.7 Resultados de resistencia última (ETF)

Especimen ETF	Ru,exp	Ru, EC3 (la=ss)	Ru, NAS	Ru, BY	Ru, BY2	Ru, ASCE	Ru, ASCE MOD	RU, SM
ETF-50x50x4N50	41,4	17,57	81,74	33,51	39,08	30,75	43,56	49,95
ETF-50x50x4N50-R	41,1	17,31	80,39	32,98	38,50	30,21	42,79	49,09
ETF-50x50x4N30	27,8	17,57	76,16	28,65	31,01	29,33	41,55	41,48
ETF-80x80x3N90	35,3	9,42	41,50	21,26	25,41	18,34	24,84	27,62
ETF-80x80x3N50	23,3	9,42	37,23	17,26	19,30	16,36	22,16	21,67
ETF-60x40x3N50	22,6	8,94	35,15	15,77	18,37	15,47	20,63	23,73
ETF-60x40x3N30	17,6	9,00	32,72	13,45	14,63	14,64	19,52	20,20
ETF-60x40x3N30-R	17,4	9,00	32,72	13,45	14,63	14,64	19,52	20,20
ETF-100x40x2N50	8,3	4,71	15,19	7,22	7,93	6,64	9,03	9,64

ETF-100x40x2N30	7,2	4,71	13,89	6,05	6,25	6,10	8,29	8,43
ETF-100x50x3N50	23	9,63	37,02	18,03	19,31	16,40	22,47	23,80
ETF-100x50x3N30	18,1	9,70	34,48	15,38	15,38	15,53	21,28	20,95
ETF-70x70x1.5N70	8,9	3,06	11,73	6,92	7,82	5,65	7,65	7,37
ETF-70x70x1.5N35	6,2	3,06	5,88	5,35	5,63	4,75	6,43	5,71
ETF-70x70x2N70	15,4	5,14	12,07	11,26	13,10	9,53	12,90	13,22
ETF-70x70x2N35	10,5	5,14	10,60	8,80	9,47	8,29	11,23	10,23
ETF-70x70x3N70	31,2	10,73	27,01	22,45	26,51	20,16	27,31	30,11
ETF-70x70x3N35	20,9	10,73	24,11	17,80	19,25	18,25	24,73	23,31
ETF-70x70x5N70	68,8	27,52	73,99	53,83	62,86	52,93	71,74	84,94
ETF-70x70x5N35	45,5	27,52	67,28	43,55	45,95	49,68	67,34	65,75
ETF-200x200x2N200	13,5	5,14	11,23	15,45	14,45	11,80	15,96	15,26
ETF-200x200x2N100	10,1	5,14	9,43	11,68	10,35	8,85	11,97	11,02
ETF-200x200x2.5N200	22,7	7,70	18,15	22,61	22,89	17,60	23,81	24,00
ETF-200x200x2.5N100	16,7	7,70	15,40	17,20	16,42	13,69	18,52	17,33
ETF-200x200x3N200	34,1	10,73	26,60	30,82	32,74	24,35	32,96	34,76
ETF-200x200x3N100	24,7	10,73	22,75	23,57	23,52	19,48	26,37	25,10
ETF-200x200x4N200	62,8	18,21	48,04	50,22	56,24	40,74	55,16	62,32
ETF-200x200x4N100	44,3	18,21	41,58	38,75	40,51	33,95	45,97	45,00
ETF-80x140x1.5N140	12,7	3,06	7,76	9,03	10,45	7,32	9,91	8,06
ETF-80x140x1.5N70	7,8	3,06	6,54	6,84	7,49	5,55	7,52	5,41
ETF-80x140x2N140	22,8	5,14	13,74	14,61	17,63	11,84	16,04	14,45
ETF-80x140x2N70	13,9	5,14	11,73	11,15	12,66	9,41	12,74	9,70
ETF-80x140x2.5N140	34,6	7,70	21,31	21,22	26,15	17,33	23,48	22,73
ETF-80x140x2.5N70	21,1	7,70	18,36	16,31	18,81	14,22	19,26	15,26
ETF-80x140x3N140	47,8	10,73	30,43	28,79	35,87	23,77	32,21	32,92
ETF-80x140x3N70	29,2	10,73	26,41	22,27	25,85	19,99	27,09	22,10
ETF-250x150x2N150	10,6	5,14	9,27	13,31	10,76	9,55	12,90	13,31
ETF-250x150x2N75	8,8	5,14	7,89	10,15	7,73	7,50	10,13	10,43
ETF-250x150x3N150	27	10,73	22,94	26,86	25,78	20,92	28,29	30,33
ETF-250x150x3N75	22,1	10,73	19,85	20,73	18,57	17,43	23,58	23,76

ETF-250x150x4N150	49,6	18,21	42,30	44,07	45,36	36,12	48,89	54,38
ETF-250x150x4N75	39,9	18,21	37,06	34,34	32,76	31,20	42,23	42,61
ETF-250x150x6N150	110,1	38,65	97,85	88,50	96,20	78,05	105,71	123,85
ETF-250x150x6N75	83,2	38,65	87,10	69,98	69,79	70,24	95,14	97,04
ETF-300x200x2.5N200	17,2	7,70	15,07	21,48	17,91	15,60	21,07	22,32
ETF-300x200x2.5N100	14,1	7,70	12,79	16,34	12,85	12,13	16,39	16,94
ETF-300x200x3N200	26,5	10,73	22,73	29,45	26,74	22,13	29,92	32,32
ETF-300x200x3N100	21,4	10,73	19,43	22,52	19,21	17,70	23,93	24,53
ETF-300x200x4N200	50,4	18,21	42,42	48,31	48,20	38,07	51,52	57,95
ETF-300x200x4N100	40,3	18,21	36,71	37,28	34,72	31,73	42,93	43,98
ETF-300x200x5N200	80,6	27,52	67,86	70,84	74,22	57,85	78,32	91,16
ETF-300x200x5N100	63,3	27,52	59,28	55,08	53,57	49,59	67,13	69,18

9.2.4 Internal Two Flanges

Tabla 9.8 Resultados de resistencia última (ITF)

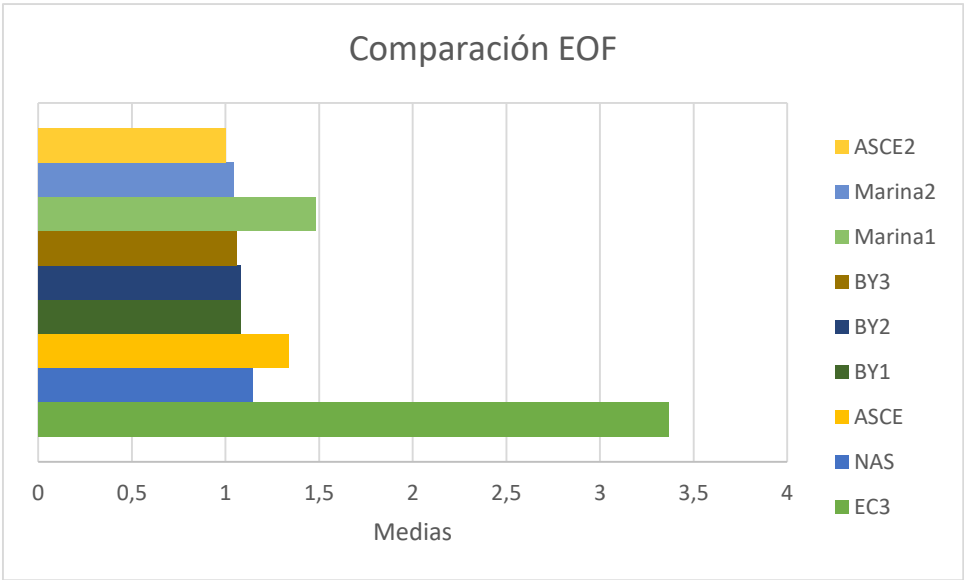
Especimen ITF	Ru,exp	Ru, EC3 (la=ss)	Ru, NAS	Ru, BY	Ru, BY2	Ru, ASCE	Ru, ASCE MOD	RU, SM
ITF-50x50x4N50	72,60	49,43	135,00	77,87	77,87	113,44	124,41	81,49
ITF-50x50x4N50-R	72,10	49,20	134,28	77,50	77,50	112,80	123,71	81,07
ITF-50x50x4N30	63,20	43,38	126,80	69,05	69,05	111,42	122,19	68,75
ITF-80x80x3N90	58,40	32,26	68,90	47,64	47,64	56,48	61,18	52,63
ITF-80x80x3N50	48,90	27,37	63,89	40,91	40,91	55,91	60,56	42,86
ITF-60x40x3N50	40,30	25,88	59,16	37,03	37,03	52,20	56,30	39,08
ITF-60x40x3N30	35,90	22,84	56,17	33,02	33,02	52,13	56,23	34,18
ITF-60x40x3N30-R	35,90	22,84	56,17	33,02	33,02	52,13	56,23	34,18
ITF-100x40x2N50	21,00	13,98	28,90	20,53	20,53	23,39	25,21	19,87
ITF-100x40x2N30	17,90	12,35	27,61	18,33	18,33	23,65	25,50	18,22
ITF-100x50x3N50	49,80	27,82	63,33	41,79	41,79	54,95	59,73	42,06

ITF-100x50x3N30	46,10	24,56	60,16	37,28	37,28	54,88	59,66	38,02
ITF-70x70x1.5N70	17,80	10,47	19,87	15,33	15,33	15,62	16,92	13,97
ITF-70x70x1.5N35	15,20	8,45	17,81	12,54	12,54	15,18	16,44	11,22
ITF-70x70x2N70	28,70	16,97	34,91	25,01	25,01	28,45	30,82	24,62
ITF-70x70x2N35	23,50	13,86	31,63	20,71	20,71	27,83	30,15	19,78
ITF-70x70x3N70	54,20	33,79	77,17	50,27	50,27	65,46	70,95	54,72
ITF-70x70x3N35	43,30	28,08	70,87	42,36	42,36	64,49	69,90	43,97
ITF-70x70x5N70	115,80	81,64	209,80	122,88	122,88	184,90	200,48	149,70
ITF-70x70x5N35	95,70	69,35	195,64	105,85	105,85	183,25	198,69	120,28
ITF-200x200x2N200	33,50	24,30	35,90	34,99	34,99	24,31	26,24	41,21
ITF-200x200x2N100	30,60	19,04	31,22	27,75	27,75	22,91	24,73	30,89
ITF-200x200x2.5N200	53,10	35,00	56,03	50,65	50,65	40,13	43,38	63,96
ITF-200x200x2.5N100	48,00	27,66	49,18	40,53	40,53	38,24	41,34	47,94
ITF-200x200x3N200	76,10	47,26	80,39	68,65	68,65	59,74	64,63	91,60
ITF-200x200x3N100	68,00	37,60	71,09	55,34	55,34	57,36	62,05	68,66
ITF-200x200x4N200	129,40	76,16	141,66	111,35	111,35	110,32	119,44	161,44
ITF-200x200x4N100	112,00	61,29	126,67	90,83	90,83	106,95	115,79	121,01
ITF-80x140x1.5N140	22,10	13,32	22,34	19,26	19,26	16,15	17,48	19,48
ITF-80x140x1.5N70	17,50	10,47	19,49	15,32	15,32	15,28	16,54	13,72
ITF-80x140x2N140	37,60	21,37	38,92	31,07	31,07	29,21	31,64	34,33
ITF-80x140x2N70	29,10	16,97	34,35	25,00	25,00	27,99	30,32	24,18
ITF-80x140x2.5N140	55,60	30,91	59,81	45,16	45,16	46,06	49,90	53,29
ITF-80x140x2.5N70	41,90	24,76	53,25	36,66	36,66	44,49	48,21	37,53
ITF-80x140x3N140	75,60	41,87	84,95	61,42	61,42	66,69	72,27	76,32
ITF-80x140x3N70	55,90	33,79	76,16	50,25	50,25	64,78	70,20	53,75
ITF-250x150x2N150	32,50	21,89	31,95	31,64	31,64	21,20	22,84	33,40
ITF-250x150x2N75	30,50	17,34	28,12	25,38	25,38	20,26	21,83	27,04
ITF-250x150x3N150	74,90	42,84	73,04	62,50	62,50	55,05	59,49	74,24
ITF-250x150x3N75	64,20	34,47	65,31	50,98	50,98	53,37	57,68	60,11
ITF-250x150x4N150	128,00	69,36	130,22	101,87	101,87	104,03	112,56	130,85

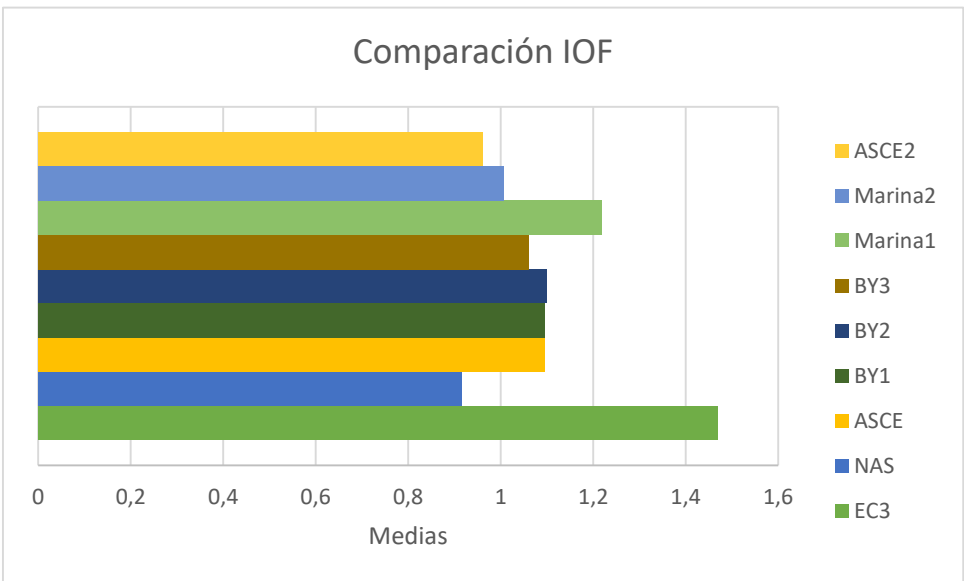
ITF- 250x150x4N75	100,90	56,48	117,6 8	84,12	84,12	101,6 2	109,95	105,9 4
ITF- 250x150x6N150	244,70	137,90	292,2 3	204,4 9	204,4 9	247,4 4	267,99	290,8 5
ITF- 250x150x6N75	187,50	114,24	267,7 7	171,8 2	171,8 2	243,5 4	263,77	235,4 9
ITF- 300x200x2.5N20 0	50,70	35,00	51,14	50,54	50,54	34,08	36,74	61,27
ITF- 300x200x2.5N10 0	47,70	27,66	44,89	40,44	40,44	32,47	35,01	48,06
ITF- 300x200x3N200	75,00	47,26	74,18	68,52	68,52	52,59	56,78	87,74
ITF- 300x200x3N100	69,00	37,60	65,60	55,23	55,23	50,49	54,51	68,83
ITF- 300x200x4N200	132,10	76,16	132,5 2	111,1 6	111,1 6	100,9 7	109,18	154,6 5
ITF- 300x200x4N100	112,40	61,29	118,5 0	90,68	90,68	97,89	105,85	121,3 2
ITF- 300x200x5N200	199,10	110,62	207,0 5	162,3 1	162,3 1	164,5 0	178,01	240,0 3
ITF- 300x200x5N100	159,30	89,84	186,6 7	133,6 5	133,6 5	160,4 3	173,61	188,3 0

9.3 Comparativa de los distintos ratios promedios obtenidos

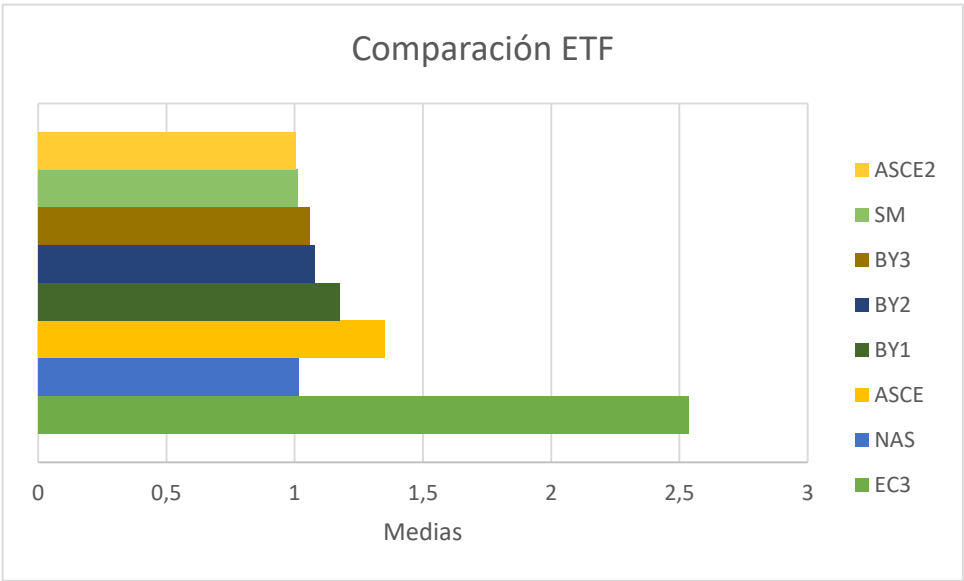
9.3.1. External One Flange



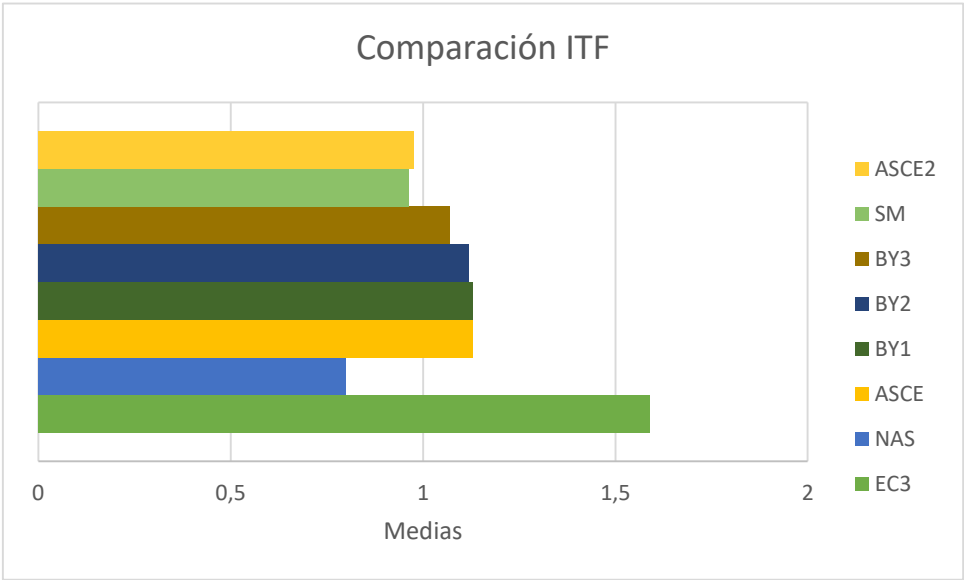
9.3.2. Internal One Flange



9.3.3. External Two Flanges



9.3.4. Internal Two Flanges



9.4. Resultados finales

9.4.1 External One Flange

EOF	EC3	NAS	ASCE	Ben Young (1)	Ben Young (2)	Ben Young (3)	Bock (1)	Bock (2)	Mod ASCE
Ratio	Pexp/PEC3	Pexp/PNAS	Pexp/PASCE	Pexp/PBY1	Pexp/PBY2	Pexp/PBY3	Pexp/PBock1	Pexp/PBock2	Pexp/PASCE2
Numero de datos	47	47	47	47	47	47	47	47	47
Media	3,37	1,14	1,33	1,05	1,08	1,06	1,48	1,04	1,003
Desviación estandar	0,82	0,16	0,2	0,14	0,075	0,067	0,36	0,11	0,15

9.4.2 Internal One Flange

IOF	EC3	NAS	ASCE	Ben Young (1)	Ben Young (2)	Ben Young (3)	Bock (1)	Bock (2)	Mod ASCE
Ratio	Pexp/PEC3	Pexp/PNAS	Pexp/PASCE	Pexp/PBY1	Pexp/PBY2	Pexp/PBY3	Pexp/PBock1	Pexp/PBock2	Pexp/PASCE2
Numero de datos	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Media	1,46	0,91	1,06	1,06	1,1	1,06	1,21	1,006	0,96
Desviación estandar	0,18	0,14	0,2	0,12	0,105	0,074	0,13	0,16	0,18

9.4.3. External Two Flanges

ETF	EC3	NAS	ASCE	Ben Young (1)	Ben Young (2)	Ben Young (3)	Strength method	Mod ASCE
Ratio	Pexp/PEC3	Pexp/PNAS	Pexp/PASCE	Pexp/PBY1	Pexp/PBY2	Pexp/PBY3	Pexp/PSM	Pexp/PASCE2
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52
Media	2,53	1,01	1,35	1,17	1,08	1,06	1,012	1,002
Desviación estandar	0,7	0,3	0,23	0,2	0,009936	0,06572	0,097	0,18

9.4.4. Internal Two Flanges

ITF	EC3	NAS	ASCE	Ben Young (1)	Ben Young (2)	Ben Young (3)	Strength method	Mod ASCE
Ratio	Pexp/ PEC3	Pexp/ PNAS	Pexp/ PASCE	Pexp/P BY1	Pexp/P BY2	Pexp/P BY3	Pexp/P SM	Pexp/P ASCE2
Numero de datos	52	52	52	52	52	52	52	52
Media	1,59	0,8	1,05	1,13	1,12	1,07	0,96	0,97
Desviación estandar	0,14	0,16	0,27	0,1	0,01	0,075	0,08	0,25

10. Referencias

- [1] Manual de diseño para acero inoxidable estructural (cuarta edición). ISBN: 978-1-85942-233-5
- [2] valbruna.com.mx/historia-del-acero-inoxidable/
- [3] Norma UNE EN 10088: Aceros Inoxidables. Parte 1: Relacion de aceros inoxidables. Parte 2: Condiciones tecnicas de suministro de planchas y bandas para uso general. Parte 3: Condiciones tecnicas de suministro para semiproductos, barras, alambren y perfiles para aplicaciones en general.
- [4] Korvink, S.A., van den Berg, G.J. & van der Merwe, P. Web crippling of stainless steel cold-formed beams. Journal of Constructional Steel Research 1995, Vol. 34, No. 2-3, pp. 225-248. ISSN 0143-974X. doi: DOI: 10.1016/0143-974X(94)00026-E.
- [5] Talja A, and Salmi P. (1995). Design of stainless steel RHS beams, columns and beam-columns. Research Note 1619, VTT Building Technology, Finland.
- [6] Zhou, F. & Young, B. Cold-Formed High-Strength Stainless Steel Tubular Sections Subjected to Web Crippling. Journal of Structural Engineering 2007, 03, Vol. 133, No. 3, pp. 368-377. ISSN 07339445. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:3(368).
- [7] Li and Young, Web crippling of cold-formed ferritic stainless steel square and rectangular hollow sections, Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, *Pokfulam Road, Hong Kong, China*
- [8] Marina Bock, Web crippling and local buckling response of stainless steel sections, Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [9] European Committee for Standardization Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules. Supplementary rules for coldformed members and sheeting. Brussels, Belgium: 2006.
- [10] North American Specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington (DC): American Iron and Steel Institute, 2001.

[11] American Society of Civil Engineers, Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, Reston, Virginia 20191-4400.

[12] Baddoo, N., Chinen, V.L., Gozzi, J., Clarin, M., Conrad, F., Talja, A., Ala-Outinen, T., Viherma, R., Nilimaa, H., Gardner, L., Zili, G., Riscifuli, S., Fattorini, F., Kasper, R., Stangenberg, H., Blanguernon, A. & Zhao, B. Structural design of cold worked austenitic stainless steel. Brussels: European Commission, 2004.